

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЬЦИНА

Л. В. Жукова  
А. С. Корсаков  
А. А. Лашова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ  
ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ  
ДЛЯ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА**

Учебник

Под общей редакцией профессора, доктора технических наук  
Л. В. Жуковой

*Рекомендовано Методическим советом Уральского  
федерального университета для студентов вуза,  
обучающихся по направлению подготовки  
18.04.01 «Химические технологии»*

Екатеринбург  
Издательство УМЦ УПИ  
2018

УДК 681.7.068(075.8)  
ББК 32.843.232.4я73  
Ж86

Рецензенты:

кафедра химии и технологии кристаллов Российского  
химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева  
(зав. кафедрой проф., д-р хим. наук И. Х. Аветисов);  
*В. И. Соломонов*, проф., д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник  
лаборатории Квантовой электроники Института электрофизики УрО РАН

**Жукова, Л. В.**

Ж86 Моделирование структуры и изготовление фотонно-кристаллических световодов для среднего инфракрасного диапазона : учебник / Л. В. Жукова, А. С. Корсаков, А. А. Лашова ; под общ. ред. проф., д-ра техн. наук Л. В. Жуковой. — Екатеринбург : Издательство УМЦ УПИ, 2018. — 254 с.

ISBN 978-5-8295-0605-6

В книге описан процесс моделирования структуры фотонно-кристаллических световодов на основе наномодифицированных галогенидсеребряных кристаллов с целью создания одномодовых световодов с увеличенным диаметром поля моды для среднего инфракрасного диапазона спектра. Большое внимание уделено изготовлению и исследованию функциональных свойств данных фотонно-кристаллических световодов. Изготавливаемые на их основе волоконно-оптические системы являются перспективной продукцией для базовых отраслей промышленности России – оптического приборостроения, химической, фармацевтической, медицинской, металлургической промышленности, атомной энергетики и космических исследований.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по направлению 18.04.01 «Химическая технология» по дисциплинам: принципы построения ИК-волоконно-оптических систем, свойства и применение ИК-световодов. Может быть использован также аспирантами, студентами, магистрами и бакалаврами, изучающими новые развивающиеся направления в фотонике, ИК-волоконной оптике и оптическом материаловедении.

УДК 681.7.068(075.8)  
ББК 32.843.232.4я73

ISBN 978-5-8295-0605-6

© Л. В. Жукова, А. С. Корсаков,  
А. А. Лашова, 2018  
© Уральский федеральный университет,  
2018

## Оглавление

Расшифровка используемых аббревиатур.....	8
Введение.....	9
Глава 1. Принципы построения ИК-волоконно-оптических систем.....	12
1.1. Методики моделирования ФКС и их анализ.....	12
1.2. Моделирование инфракрасных световодов «методом источников» .....	18
1.3. Экспериментальное определение основных исходных и конечных параметров моделирования .....	21
1.3.1. Выбор профиля ИК-световода .....	22
1.3.2. Относительный размер вставки и доля заполнения .....	22
1.3.3. Моделирование структуры световода .....	23
1.3.4. Фазовая диаграмма и критерий «отсечки» .....	25
1.3.5. Результаты моделирования модового состава и критерии отбора .....	27
1.3.6. Определение радиуса поля фундаментальной моды.....	35
1.3.7. Нормированная частота .....	36
Выводы по главе 1 .....	38
Задачи.....	39
Библиографический список.....	40
Глава 2. Принцип моделирования основных оптических параметров световода .....	47
2.1. Уравнения Максвелла .....	47
2.1.1. Интегральная форма уравнений Максвелла .....	47
2.1.2. Дифференциальная форма уравнений Максвелла ....	48
2.2. Основы передачи электромагнитного излучения.....	49
2.2.1. Распространение электромагнитных волн в фотонно-кристаллических световодах .....	49
2.3. Световод со ступенчатым изменением показателя преломления.....	53
2.3.1. Уравнение Максвелла для цилиндрического световода.....	53
2.3.2. Расчет оптических характеристик световода .....	55
2.3.3. Расчет нелинейных характеристик световода .....	57
2.4. Фотонно-кристаллический световод.....	58

2.4.1. Уравнение Максвелла для фотонно-кристаллического световода с твердотельной сердцевиной.....	58
2.4.2. Расчет оптических характеристик ФКС.....	63
2.4.3. Расчет нелинейных характеристик ФКС.....	64
Выводы по главе 2.....	65
Задачи.....	66
Библиографический список.....	67
Глава 3. Моделирование структуры световода.....	69
3.1. Исследование модовой дисперсии световода в зависимости от разности квадратов показателей преломления.....	69
3.1.1. Основные параметры симуляции ФКС.....	69
3.1.2. Исследование модового режима ФКС в зависимости от разности квадратов показателей преломления.....	71
3.2. Исследование структуры поля моды в зависимости от размера вставок и межвставочного расстояния.....	73
3.2.1. Конфигурация и оптические свойства световодов ...	73
3.2.2. Фазовая диаграмма и критерий отсечки одномодового режима.....	75
3.2.3. Моделирование световодов с гексагональной конфигурацией вставок.....	77
3.2.4. Моделирование световодов с октагональной конфигурацией вставок.....	84
3.2.5. Моделирование ФКС с двумя кольцами вставок.....	88
Выводы по главе 3.....	91
Задачи.....	92
Библиографический список.....	93
Глава 4. Технология изготовления одно- и многомодовых ИК-световодов.....	94
4.1. Технология изготовления нанокристаллических ИК-световодов.....	94
4.1.1. Экструзия световодов методикой «stack-and-draw»	94
4.1.2. Экструзия преформы-«поленницы» комбинированием методик «stack-and-draw» и «rod-in-tube».....	97



4.1.3. Технология изготовления одно- и многослойных волоконных сцинтилляторов .....	98
4.2. Экструзия волокна.....	99
4.2.1. Этап 1 – экструзия заготовки для материала матрицы.....	100
4.2.2. Этап 2 – экструзия заготовки для материала вставок.....	102
4.2.3. Этап 3 – подготовка трубки для сложной преформы .....	103
4.2.4. Этап 4 – перетягивание простой преформы методом «rod-in-tube» .....	104
4.2.5. Этап 5 – перетягивание составной преформы методом «rod-in-tube» со «штабиком-поленницей».....	105
4.2.6. Этап 6 – получение микроструктурированного волокна .....	105
4.3. Поддержание продольной однородности микроструктуры.....	106
4.3.1. Контроль диаметра элементов микроструктуры.....	107
4.3.2. Нивелирование конусности экструзии и доработка алгоритма.....	110
Выводы по главе 4 .....	115
Задачи.....	116
Библиографический список.....	117
Глава 5. Оптико-механические свойства ИК-световодов.....	118
5.1. Определение примесей, химического состава и структуры кристаллов .....	118
5.1.1. Рентгенофлуоресцентный метод.....	118
5.1.2. Атомно-эмиссионная спектроскопия .....	119
5.1.3. Дифференциально-термический анализ диаграммы фазового состояния систем.....	120
5.1.4. Рентгеноструктурный анализ твёрдых растворов галогенидов серебра и таллия (I).....	121
5.1.5. Сканирующая электронная микроскопия .....	122
5.1.6. Оптическая микроскопия.....	122
5.2. Оптические свойства нанокристаллических ИК-световодов .....	123
5.2.1. Определение спектрального диапазона пропускания ИК-кристаллов .....	123

5.2.2. Определение дисперсии показателя преломления..	124
5.2.3. Определение фотостойкости .....	140
5.2.4. Определение пропускания ИК-световодов.....	141
5.2.5. Метод отрезков при определении оптических потерь в ИК-световодах .....	143
5.2.6. Исследование пространственного распределения мод, вытекающих из ИК-световодов .....	144
5.2.7. Определение спектров люминесценции волоконных сцинтилляторов .....	146
5.2.8. Исследование радиационной стойкости ИК-световодов.....	147
5.3. Механические свойства нанокристаллических ИК-световодов .....	149
5.3.1. Определение предела прочности ИК-световодов на разрыв.....	149
5.3.2. Исследование зависимости влияния состава кристаллов на коэффициент Пуассона, модуль Юнга и модуль сдвига .....	149
Выводы по главе 5 .....	150
Задачи.....	150
Библиографический список.....	152
Глава 6. Свойства и применение ИК-световодов .....	154
6.1. Спектральный диапазон прозрачности ИК-световодов	154
6.2. Оптические потери, плотность мощности передаваемого ИК-излучения, влияние радиуса изгиба на оптические потери .....	160
6.3. Исследование пространственного распределения мод, вытекающих из ИК-световодов, в дальнем поле .....	164
6.3.1. Одномодовые фотонно-кристаллические ИК-световоды .....	165
6.3.2. Профилирование торцов и боковой поверхности ИК-световодов.....	169
6.4. Исследование люминесцентных свойств волоконных сцинтилляторов.....	174
6.5. Исследование радиационной стойкости ИК-световодов .....	177
6.6. Исследование механических свойств ИК-световодов ..	182

Выводы по главе 6 .....	186
Задачи.....	187
Библиографический список.....	188
Глава 7. Практическое применение инфракрасных световодов ....	190
7.1. Однослойные и двухслойные ИК-световоды.....	191
7.1.1. Зондовая ИК-Фурье-спектрометрия .....	191
7.1.2. Анализ ванн электролитов золочения .....	196
7.1.3. Спектрометрический метод в криминалистике с применением волоконного зонда .....	198
7.1.4. Анализ водных растворов метанола .....	201
7.1.5. Определение количества влаги в трансформаторном масле.....	204
7.1.6. Регистрация ионизирующих излучений.....	208
7.1.7. Лазерная медицина .....	210
7.1.8. Низкотемпературная ИК-пирометрия .....	213
7.1.9. Передача теплового изображения через оптическую волоконную сборку .....	219
7.1.10. Контроль термического состояния лопаток газотурбинных установок .....	222
7.1.11. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия для биологических исследований.....	223
7.2. Использование ФКС волокон в оптическом приборостроении .....	226
7.2.1. ФКС для лазерной медицины на длине волны 5,75 мкм.....	226
7.2.2. ФКС для космических исследований на длине волны 10,0 мкм .....	230
7.2.3. ФКС для атомной энергетики на длине волны 10,6 мкм.....	232
Выводы по главе 7 .....	234
Задачи.....	235
Библиографический список.....	236
Приложение 1.	
Патенты российской федерации .....	240
Приложение 2.	
Награды, полученные на международных выставках.....	251

## РАСШИФРОВКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ АББРЕВИАТУР

ФКС – фотонно-кристаллический световод  
ИК – инфракрасный  
ФЗЗ – фотонные запрещенные зоны  
ЭМ – электро-магнитное поле  
FEM – finite element method  
SMT – source-model technique  
PWM – pulse width modulation  
LFM – longitudinal field modulator  
EIM – equivalent input modulation  
ПК – персональный компьютер  
SMTP – source-model technique package  
FF – filling fraction  
SC – solid-core fiber  
HC – hollow-core fiber  
AC – active-core fiber  
SIF – step index fiber  
ПВО – полное внутреннее отражение  
ПП – показатель преломления  
Hex – hexagonal  
Oct – octogonal  
FSM – space-filling mode  
FTIR – Fourier transform infrared spectroscopy  
РЕЕК – полиэфирэфиркетон  
MIR – среднеинфракрасный диапазон спектра  
MSF – микроструктурированные оптические волокна  
НПВО – нарушенное полное внутреннее отражение  
МНПВО – многократное нарушенное полное внутреннее отражение  
КРТ – кадмий-ртуть-теллур  
УФ – ультрафиолетовый  
ТЕ – поляризация электрического вектора  
ТМ – поляризация магнитного вектора  
LP – linear polarization  
КИПиА – контрольно-измерительные приборы и аппараты  
АРМ – автоматизированное рабочее место  
ПГС – параметрический генератор света

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время достаточно хорошо изучены и освоены ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный (ИК) диапазоны спектра, в которых для передачи излучения применяются кварцевые световоды, прозрачные от 0,2 до 2,0 мкм. Для развития инфракрасной волоконной и лазерной оптики и фотоники актуален поиск материалов, прозрачных в среднем (от 2 до 50 мкм) и дальнем (до 100 мкм) ИК-диапазонах. Освоение указанных диапазонов оптических частот открывает качественно новые возможности в скорости, надёжности, защищённости и направленности передачи информации. Создание функциональных элементов для генерации, передачи, регистрации и управления такими излучениями является актуальной на сегодняшний день задачей. Развивающиеся отрасли фотоники требуют расширения теоретических и практических исследований в области влияния структуры и компонентного состава на функциональные свойства ИК-световодов. Особую роль приобретает изучение и синтез многофункциональных материалов, способных соответствовать мировым тенденциям в миниатюризации и универсальности волоконных приборов и устройств различного применения.

Существует проблема в области аналитики, лазерной медицины, конфокальной лазерной сканирующей микроскопии по разработке быстро реагирующих детекторов и каналов доставки аналитических сигналов от исследуемой области к приемникам оптического излучения. Наиболее быстрым информационным сигналом является свет (электромагнитная волна), в связи с чем поиск и создание материалов для его передачи в среднем ИК-диапазоне является актуальной задачей современности.

Поликристаллические световоды на основе кристаллов систем  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$  и  $\text{TlBr} - \text{TlI}$  (КРС-5) по сравнению с халькогенидными и флюоридными волокнами прозрачны в широком спектральном диапазоне и имеют низкие оптические потери на длине волны 10,6 мкм. Диаграммы плавокости этих систем образуют непрерывный ряд твёрдых растворов с минимальной температурой плавления 412 °С, кристаллы данных систем негигроскопичны, пластичны, прозрачны в спектральном диапазоне от 0,4 до 40,0 мкм, не обладают эффектом спайности, поэтому из них методом экструзии получают ИК-световоды. Волокна, изготовленные на основе кристаллов КРС-5 радиационно стойкие, но

быстро разрушаются вследствие рекристаллизации, галогенидсеребряные световоды, напротив, не подвергаются эффекту рекристаллизации, однако являются светочувствительными. В связи с этим диаграммы плавкости на основе галогенидов серебра и одновалентного таллия представляют особый интерес, так как позволяют получить кристаллы, устойчивые к свету и не подвергающиеся рекристаллизации, а также выявить возможность выращивания радиационно стойких материалов с целью получения на их основе устойчивых световодов для среднего и дальнего ИК-диапазонов спектра.

Исследование кристаллов твердых растворов систем  $\text{AgCl-AgBr}$  и  $\text{TlBr-TlI}$ , а также изделий на их основе осуществляется в Уральском федеральном университете на базе Центра инфракрасных волоконных технологий (ИВЦ «ЦИВТ»). В ИВЦ «ЦИВТ» УрФУ выполняется непрерывная последовательность фундаментальных и прикладных исследований в области поиска и создания новой элементной базы фотоники для оптического и лазерного приборостроения – кристаллов, ИК-световодов, линз, окон, плёнок и другой оптики.

Особым направлением исследований является разработка микроструктурированных волокон, в том числе и фотонно-кристаллических, которые представляют собой новый класс компонентов нелинейной оптики. Фотонно-кристаллические световоды (ФКС) позволяют получить волокна с диаметром поля фундаментальной моды до 200 мкм, работающие в одномодовом режиме, обладающие высокими селективными свойствами и прочностными характеристиками, а также пропускающие энергию высокой мощности. Перечисленные свойства ФКС достигаются наличием фотонных запрещенных зон (ФЗЗ), расположенных вокруг сердцевины волокна в виде кольца вставок с меньшим показателем преломления, чем основной материал сердцевины световода.

Одной из основных задач по разработке фотонно-кристаллической структуры световодов является моделирование и анализ модового состава с целью выявления оптимальных параметров оптических волокон различного функционального назначения. Так как в фотонно-кристаллических волокнах наблюдаются многочисленные нелинейные эффекты, помимо прогнозирования геометрических и оптических параметров, требуется оценить и возможные нелинейные свойства. Для исследования нелинейных характеристик в ФКС на основе галогени-

нидсеребряных кристаллов удобно применять моделирование в программе SMTP (source – model technique package), интегрированной в Matlab, поскольку симуляция передачи излучения в данной среде позволяет оценить потери в оболочке (матрице) волокна, эффекты самофокусировки и расфокусировки пучка, а также фазовую самомодуляцию. Особенностью SMTP является возможность загрузки и программного задания геометрии любого сечения ФКС при минимальном наборе входных параметров: диапазоне передаваемых длин волн, значениях показателей преломления, диэлектрических и магнитных проницаемостей сред. В результате симуляции в среде SMTP получаются модели распространения излучения в поперечном сечении волокна любой конфигурации, которые обладают высокой сходимостью с реальными световодами.

Развитие волоконно-оптических систем техники нового поколения выдвигает требование по созданию одномодовых световодов ИК оптического диапазона с аномально большим диаметром поля моды (более 100 мкм), повышенной числовой апертурой, а также фото- и радиационной стойкостью. Исследования ведущих мировых научных центров, в том числе и ИВЦ «ЦИВТ», показали, что на основе системы  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$  возможно создание таких фотонно-кристаллических световодов. В то же время разработка радиационно стойких композиций на основе галогенидов серебра и одновалентного таллия может обеспечить расширение спектрального диапазона работы световодов.

Таким образом, теоретическое и экспериментальное исследование природы ИК-излучения и явлений при его распространении и взаимодействии с кристаллами твёрдых растворов галогенидов серебра и таллия (I), а также световодами на их основе, разработка микроструктурированных световодов для передачи информации, энергии, диагностики природных и техногенных процессов, фундаментальные оптические исследования в области интерференции, ИК-спектроскопии, дисперсии показателя преломления, люминесценции фотонно-кристаллических световодов и кристаллов, создание новых принципов построения волоконно-оптических систем и инструментов для среднего ИК-диапазона спектра являются актуальными задачами фотоники.

### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### 1.1. Методики моделирования ФКС и их анализ

Моделирование модового состава цилиндрических световодов осуществляется с помощью ряда методов, некоторые из которых используют скалярные или векторные обработки уравнений Максвелла. Общей стратегией всех методик является применение в поперечной плоскости периодических граничных условий, однако такие решения обязательно заменяют конечную структуру световода на бесконечную и, следовательно, не могут решить проблему потерь, связанных с распространением электромагнитной волны (ЭМ-волны) в поперечно конечной структуре (потери через боковую стенку и в конфайнменте) [1].

При моделировании сложных волоконных структур, одной из которых является ФКС, применяются многочисленные методики, которые по основным принципам вычисления и определения граничных условий могут быть разделены на следующие группы:

- методы плоской волны;
- методы точечного согласования на границах включений;
- методы проектирования компонентов поля на границу раздела сред.

Каждый из этих подходов позволяет определять некоторые свойства ФКС, однако ни одна из приведенных методик не учитывает в полной мере характеристики геометрии включений, нелинейные эффекты, потери в поперечном сечении. Стандартные методы распространения луча используют численный алгоритм для моделирования прохождения когерентного пучка вдоль волокна любой геометрии и позволяют рассчитать модальные потери, типы моды и их свойства. Современные методики компьютерного моделирования используют приведенные ранее численные методы, дополненные каким-либо подходом, уточняющим результаты и отвечающим целям симуляции. Так, алгоритм проектирования компонентов поля на границу раздела сред, дополненный мультипольным методом, описанным в работах ряда ученых [1–8], позволяет оценить эффективный диаметр сердцевины



ФКС и распространение ЭМ-поля в поперечном сечении волокна. Расчеты по данному алгоритму показывают возможность создания волокон с фотонными вставками различной структуры с диаметром сердцевины вплоть до 200 мкм [9].

В работах [1–5] описана мультипольная методика для ФКС с круглыми включениями, обладающая высокой точностью и быстрой сходимостью, таким образом, позволяющая рассчитывать системы с большим количеством вставок. В данной формулировке Вайт с соавт. учитывают свойства симметрии мод в ФКС с регулярно размещенными включениями, получают как действительную, так и мнимую части постоянной распространения моды, а также в качестве входного параметра принимают частоту ЭМ-волны. Ямашита с соавт. используют аналогичный метод для обычных волокон с несколькими вставками, однако они используют метод точечного согласования на границах включения [8, 9], тогда как Вайт и соавт. применяют граничные условия путем проектирования компонент поля на ортонормированный базис.

Применение мультипольного подхода в работе Вайта позволило вычислить модальные свойства микроструктурированного волокна с твердотельными и воздушными вставками. Главным практическим результатом данной работы стала возможность применения частоты ЭМ-волны  $\omega$  в качестве входного параметра с последующим расчетом константы распространения  $\beta$ , что контрастирует с методом плоской волны, в котором  $\beta$  фиксировано, а из расчета следует  $\omega$  и требует существенно меньших вычислительных мощностей, чем метод точечного согласования на границах включений. Мультипольный подход основан на уравнениях Максвелла для распространения ЭМ-волн и использует масштабирование магнитных полей  $K$  с помощью полного сопротивления свободного пространства  $Z$ :  $K = ZH$ , где  $H$  – напряженность магнитного поля. Каждый модальный режим, найденный в процессе расчета, характеризуется константой распространения и поперечной зависимостью полей:

$$E(r, \theta, z, t) = E(r, \theta) \exp[i(\beta z - \omega t)], \quad (1.1)$$

$$K(r, \theta, z, t) = K(r, \theta) \exp[i(\beta z - \omega t)], \quad (1.2)$$

где  $\omega$  – угловая частота, связанная с волновым числом свободного пространства, как  $\omega = kc$ . Результаты расчета позволяют оценить действительную и мнимую части излучения, проходящего по волокну,

причем действительная часть несет информацию по распределению интенсивности в поперечном сечении волокна, а мнимая учитывает затухание вдоль оси-z световода. Полученные по уравнениям (1.1) и (1.2) электромагнитные моды соответствуют свойствам симметрии конфигурации волокна, таким образом, мультипольный подход позволяет рассчитывать режимы в минимальном секторе волокна, ускоряя расчет без снижения точности.

Симметричный подход к моделированию волоконных структур был использован для анализа многоядерных волокон авторами работ [10–14] Ямашитой и МакИсааком. В работе [14] МакИсаак определил размер рассчитываемого сектора для различных классов модальных режимов, зависящих от симметрии самой структуры: «невыврожденные» классы мод имеют полную симметрию структуры, их необходимо вычислять в минимальном секторе, края которого должны совпадать с осью симметрии структуры; «вырожденные» классы проявляют полную симметрию в соответствующей линейной комбинации, для них минимальный расчетный сектор составляет  $90^\circ$ . Разница между указанными классами заключается в применяемых граничных условиях [12].

Классификация режимов ФКС была приведена и описана в работах [15–18]. Авторы разделили различные структуры по конфигурации (наличию или отсутствию центра, количеству вставок, показателю преломления материалов) и механизмам передачи излучения (механизмам фотонных запрещенных зон и полного внутреннего отражения), на основании чего выразили четыре класса режимов:

- строго связанные моды, распространяющиеся строго по центру ФКС и имеющие нулевые потери на удержание;
- строго связанные моды, распространяющиеся по всей эффективной площади волокна (сердцевине) за счет механизма ФЗЗ и имеющие нулевые потери на удержание;
- моды с неполным отражением от ФЗЗ, обладающие малыми потерями на удержание;
- остальные режимы с высокими потерями на удержание.

На основе исследований модальных режимов Хохман и Ливиатан разработали методику моделирования источников света (SMT), в которой объединили мультипольный подход с методом конечных элементов [15–16]. Особенность дополнения SMT методом конечных эле-

ментов заключается в необходимости учета рассеяния излучения в поперечном сечении волокна. Хохман и Ливиатан решают задачу рассеяния для конкретных пар  $\beta$  и  $\nu$  в условиях поперечного резонанса с помощью матрицы импеданса, которая была рассмотрена ранее в работе [19] для анализа ФКС с регулярным шагом изменения показателя преломления в цилиндрическом волокне [15].

В работе [16] авторы оценили необходимое количество источников излучения и контрольных точек снаружи и внутри вставок, соответственно, построили дисперсионные кривые и модели поля ФКС с воздушным (полым) сердечником, показали наличие большого количества связанных мод, отраженных от областей с меньшим, чем у матрицы, показателем преломления.

В дальнейших работах [17–18] Хохман и Левиатан предложили использовать теорему Пойнтинга для вычисления константы затухания с помощью метода, используемого для вычисления потерь в диэлектрических волноводах конечной длины, основанного на итеративном подходе.

Отдельное исследование фотонных запрещенных зон и возникающих нелинейных эффектов было проведено Ксе Лином в работе [20]. Автор рассмотрел различные кристаллические структуры с одномерным, двумерным и трехмерным изменением показателя преломления на основе различных материалов для видимого (кварцевое стекло) и инфракрасного (халькогенидное стекло) диапазонов. Для фотонных структур автор исследует и описывает математически нелинейные эффекты: фазовую самомодуляцию, возникающую при сдвиге частоты из-за изменения диэлектрической проницаемости в волокне, комбинационное рассеяние, при котором снижается частота проходящего излучения, Бриллюэновское рассеяние. По результатам исследований автор представил схематический проект фотонно-кристаллического волоконного усилителя с полыми вставками на основе двуокиси кремния с описанием этапов его производства.

В работах [21–23] Марцин Шпулак с соавт. сравнили четыре подхода к моделированию: методы конечных элементов (finite element method – FEM), исходной модели (source-model technique – SMT), плоских волн (pulse width modulation – PWM) и локализованных функций (longitudinal field modulator – LFM) при симуляции фотонно-кристаллического волокна с эллиптически деформированным сердечником. Для сравнения были выбраны следующие характеристики волокна:

спектральная зависимость фазы и эффективных показателей преломления, двулучепреломление, дисперсия групповой скорости и потери удержания. Выбор авторами векторных подходов к моделированию обусловлен необходимостью в построении точной геометрии перпендикулярного сечения волокна, которая должна воспроизводить профиль реального световода с точностью до 40,0 нм.

Сопоставление результатов моделирования различными методами показало высокий уровень их сходимости: наименьшее различие результатов между SMT и FEM, наибольшее – между SMT и LFM. Авторы поясняют, что остаточные различия между представленными подходами являются результатом неточностей в представлении сплайн-аппроксимированной геометрии волокон в базисных функциях.

Отдельным классом фотонно-кристаллических световодов являются ФКС с полыми сердечниками «кагоме» или ФКС-волокна с квадратной решеткой. Исследование распространения света в «кагоме» подобных волокнах было проведено в работе [24] Л. Ченом с соавторами. Авторы работы предложили упрощенную структуру «кагоме»-волокон, для которой может быть найдено аналитическое решение, затем применение теории возмущений для анализа разницы между идеальной структурой и реалистичным волокном, после чего выполнен расчет затухания. Применяя данный алгоритм, авторы вывели нетривиальное решение для полного набора режимов и показали наличие экспоненциально локализованной фундаментальной моды внутри центрального дефекта. Разработанный авторами алгоритм предполагает расчет суперклеток – ячеек, каждая из которых может рассматриваться как элемент структуры, содержащий « $N \times N$ » примитивных ячеек в поперечной плоскости, последовательное вычисление структур которых позволяет с высокой точностью оценить распространение и потери ЭМ-излучения внутри структуры. Подобная методика может быть применена при расчете сложных фотонных структур с многими кольцами вставок и наличием элементарной повторяемой структуры, аналогично «кагоме»-волокнам, однако является ресурсоемкой и математически сложной, в связи с чем не применима для ФКС с малым количеством вставок.

Метод суперячеек при моделировании ФКС был реализован в работе Янфенга Ли и соавторов [25, 26]. Авторы приняли в качестве ключевых параметров эффективные показатели преломления матрицы и

вставок, показали зависимость эффективного радиуса сердцевинки ФКС от диаметров включений и длины волны. Само моделирование осуществлялось в два этапа: на первом этапе были определены геометрические и оптические свойства структуры, а именно выполнена аппроксимация элементарной многоугольной ячейки как эквивалентной круговой вставки радиуса  $r$  и присвоены показатели преломления соответствующим элементам структуры, затем были решены характеристические уравнения и получено N-мод, по которым определялись V-параметр, дисперсия и числовая апертура. Для расчета авторы использовали метод слабого наведения (equivalent input modulation – EIM), дополненный методом суперячеек, что позволило повысить скорость и точность расчета. Главным результатом исследования стала определенная авторами зависимость точности моделирования от размера эквивалентной круговой ячейки. Модернизированный метод EIM показал высокую эффективность при моделировании фотонных структур с большим количеством вставок одинакового диаметра и показателя преломления, однако по точности EIM не превосходит FEM и SMT.

Фотонно-кристаллическое волокно с гексагональной структурой вставок и сердцевинкой ромбической формы было смоделировано авторами работы [27] методом конечных элементов (FEM) с целью определения характеристик световода для анализа водных аналитов. В [27] авторы исследовали потери в конфайнменте (на удержание структуры моды в поперечном сечении) и пропускаемую мощность излучения, а также получили важные параметры ФКС, такие как эффективная площадь моды, числовая апертура, нормированная частота. При решении FEM-уравнений были получены эффективные показатели преломления  $n_{\text{eff}}$ , аналогично алгоритму метода SMT, на основе которых авторы оценивают потери в конфайнменте и вычисляют чувствительность  $R$  волокна:  $R = n_r f / n_{\text{eff}}$ , где  $n_r$  – показатель преломления среды, в которую выходит излучение,  $f$  – фракция мощности, представляющая собой отношение мощности излучения внутри вставок к полной мощности ФКС.

Для практического применения ФКС важным параметром является плотность оптической мощности, которая определяет нелинейность с помощью эффективной площади волокна  $A_{\text{eff}}$ :

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint |E|^2 dx dy)^2}{(\iint |E|^4 dx dy)}, \quad (1.3)$$

где  $E$  – величина компоненты электрического поля среды. Теперь нелинейность  $\gamma(\lambda)$  волокна можно оценить по уравнению

$$\gamma(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_m}{A_{eff}} [W^{-1}m^{-1}], \quad (1.4)$$

где  $n_m$  – показатель преломления матрицы ФКС.

Более подробное исследование нелинейности в ФКС было проведено Лимпером с соавт. [28] для фотонно-кристаллического волокна с воздушными вставками и двумя типами сердечников: твердотельным и полым. В данной работе авторы рассчитывают параметры нелинейности  $\gamma(\lambda)$  для обоих типов ФКС и поясняют меньшую нелинейность в волокнах с твердым сердечником.

Таким образом, на основе рассмотренных наиболее часто применимых для моделирования подходов [1–28], а также по дополнительно исследованным более редким методам [29–35] был отобран метод источников – SMT для симуляции фотонно-кристаллических волокон на основе галогенидов серебра и одновалентного таллия [35–41]. Исследования показали, что на основе полученных данных при моделировании SMT могут быть оценены оптические характеристики: эффективные показатели преломления, числовая апертура, нормированная частота; параметры проводимости ЭМ-излучения, такие как распространение поля в поперечном сечении ФКС, потери в конфайнменте, нелинейные свойства. Перечисленных параметров достаточно, чтобы оценить необходимые свойства и работоспособность ФКС до этапа его изготовления.

## **1.2. Моделирование инфракрасных световодов «методом источников»**

Метод источников (SMT), разработанный израильскими учеными Хохманом и Левиатаном, является полностью векторным подходом к решению уравнений Максвелла дифференциального вида. SMT применяется для моделирования распространения оптического излучения в поперечном сечении волокна с цилиндрическими вставками и позволяет оценить потери в конфайнменте и нелинейные свойства [15–18].

В методике SMT излучение задается фиктивными источниками и тестовыми точками: в каждой области сечения осуществляется ап-

проксимация границ включений, вдоль которых равномерно располагается комбинация элементарных источников; внутри включений размещаются тестовые точки. Источники излучают в однородной среде в условиях оптических свойств реального материала ФКС, в связи с чем могут быть применены аналитические выражения, исключаящие Френелевское отражение и потери на рассеяние излучения вдоль оси световода. Амплитуды и частоты излучения элементарных источников определяются так, чтобы удовлетворять условиям непрерывности. Для повышения точности моделирования необходимо, чтобы количество точек тестирования превышало число источников. В качестве элементарных источников в SMT используются электрические и магнитные токовые нити, несущие продольно изменяющиеся токи, которые изменяются с  $z$ -координатой по экспоненциальному закону:  $F(z) = e^{jz\beta}$ . Для каждой пары рассматриваемых частоты  $\nu$  и константы распространения  $\beta$ , которые определяют наименьшую квадратичную ошибку расчета, находится решение уравнений распространения. При обнаружении пары с достаточно низкой ошибкой решения модель источников аппроксимирует поля для получения шаблонов поля моды и некоторых параметров распространения: нормализованной частоты, эффективных показателей преломления, числовой апертуры. Метод источников SMT позволяет упростить расчет при введении условий симметрии конфигурации ФКС в соответствии с классификацией электромагнитных

мод [1, 12, 33]. Для полностью симметричных структур возможно вычисление поля только в минимальном секторе: для гексагональных в области  $60^\circ$  (для невырожденных мод –  $30^\circ$ ), для октагональных в области  $45^\circ$ . Края сектора должны совпадать с осью структуры. Применение условий симметрии ограничено набором структур: световод должен иметь непересекающиеся круговые включения, симметрия должна быть полной по всем ее осям.

Независимость распространения ЭМ-поля от  $z$ -координаты, непрерывность поля при переходе из матрицы во вставки и возможность сосредоточить вычислительные мощности в узком секторе ФКС делает модель источников SMT высокоточной, с высоким уровнем сходимости с реальным волокном.

Компьютерное моделирование в программе SMTP, интегрированной в Matlab, осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе выполняется программирование геометрии в среде Matlab или загрузка рисунка с конфигурацией, которые открываются в SMTP в разрешении \*.gd или \*.jpg соответственно. Данные способы задания геометрии удобны для пользователя возможностью симуляции передачи излучения по реальному световоду и сравнения с моделью идеальной структуры, а также возможностью масштабирования изображения до достижения нужных диаметров световода и включений. Кроме того, особенностью данного способа задания конфигурации является возможность моделирования структур сложной формы: границы включений описываются программно с помощью сплайн-аппроксимации, что позволяет сократить временные затраты на математическое описание сложной геометрии вставок.

На втором этапе задаются диэлектрические проницаемости  $\epsilon_r$  матрицы и включений ФКС при постоянной для оптических материалов магнитной проницаемости  $\mu_r = 0,999$ .

На третьем этапе определяется количество источников и тестовых точек и их расположение в структуре ФКС. Рекомендуемое количество контрольных точек задается автоматически, однако может быть увеличено пользователем в случае сложных геометрий или больших диаметров включений. Количество тестовых точек должно превышать количество источников в 1,3 раза для повышения точности и соблюдения условий непрерывности.

На четвертом этапе задаются параметры моделирования: длина волны или их диапазон, во втором случае необходимо задавать несколько значений  $\lambda$  с некоторым регулярным шагом для получения полной картины распространения излучения в указанном диапазоне; максимальное и минимальное значение показателей преломления в рамках данной структуры; максимально допустимая погрешность расчета; количество итераций; класс симметрии. Также программа позволяет управлять моделированием режимов и мод: запрашивает разрешение на отображение процесса расчета, позволяет ускорить расчет без дополнительных итераций. По окончании расчета программа выводит на экран таблицу с найденными эффективными показателями преломления, соответствующими конкретным модовым режимам, с погрешностью их вычисления.

На пятом этапе пользователь может построить модель распространения электрического ( $E_x$ ,  $E_y$ ) или магнитного ( $H_x$ ,  $H_y$ ) векторов поля, а также комплексного вектора Пойнтинга.



По окончании моделирования получается двухмерная картина распространения ЭМ-поля в поперечном сечении световода с цветовой шкалой интенсивности излучения. Данная двухмерная модель может быть переведена в трехмерную с помощью специальных программных пакетов.

### **1.3. Экспериментальное определение основных исходных и конечных параметров моделирования**

Компьютерное моделирование с помощью программного пакета SMTP предназначено для определения режима работы световода с поиском и перечислением всех мод проходящего электромагнитного излучения в зависимости от рассчитанного эффективного показателя преломления материала световода. Перед началом моделирования необходимо загрузить в программу геометрию поперечного сечения волокна или задать ее с помощью графических функций Matlab в соответствующем формате. Исходными данными для симуляции являются диаметры сердцевины, оболочки и вставок, расположение источников излучения, диэлектрические проницаемости и показатели преломления сред, диапазон передаваемых длин волн. Выходными данными являются двухмерные графические зависимости интенсивности проходящего излучения от диаметра сечения волокна, количество мод переданного излучения, эффективные показатели преломления для каждой моды и итерационная ошибка их вычисления.

Математическая основа программы предполагает, что рассчитанным минимумам энергии излучения соответствуют моды проходящих электромагнитных волн, поиск которых и осуществляется в заданном диапазоне показателей преломления на заданной длине волны.

Изначально программа SMTP, интегрированная в Matlab, создавалась для моделирования передачи излучения по кварцевым волокнам. Для подтверждения применимости данного метода компьютерного моделирования для световодов одномерной структуры на основе инфракрасных кристаллов системы AgBr – AgCl и двумерной конфигурации на основе систем кристаллов AgBr – AgCl и AgBr – TlI была проведена симуляция пропускания излучения по кварцевым волокнам производства CeramOptec, Fujikura, THORLABS. Диаметры сердцевины составляли 9, 50, 110, 200, 600 мкм, моделирование и измерение проводилось на длинах волн 532,

632, 1550 нм с визуализацией пучка с помощью пироэлектрической камеры Pygcam III (Spiricon). В результате получена полная сходимость между экспериментальным определением поля моды и результатами моделирования. Симуляция распространения излучения в однослойных ИК-волокнах на основе твердого раствора  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$  осуществлялась для структур с диаметрами сердцевины 500 мкм для длины волны 10,6 мкм [37–42]. После построения моделей была выполнена верификация полученных данных с инфракрасными волокнами с пропусканием излучения  $\text{CO}_2$  лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм) через световод 500 мкм. Сравнение результатов показало высокую степень соответствия симуляции опытным значениям. Эти данные подтверждают применимость программы SMTP для исследования структуры ИК-световодов на основе галогенидов металлов.

### ***1.3.1. Выбор профиля ИК-световода***

В данной работе рассматриваются волокна с диаметрами эффективной сердцевины ФКС, равными расстоянию между внутренними границами диаметрально противоположных вставок. Подобное значение диаметра обусловлено возможностью и необходимостью создания одномодовых микроструктурированных (ФКС) волокон [43] с большой площадью моды [44–46] для передачи излучения источников среднего ИК [47–50] с возможностью интеграции в существующие волоконно-оптические системы либо их создания [51].

### ***1.3.2. Относительный размер вставки и доля заполнения***

Важной характеристикой микроструктуры является соотношение диаметра  $d_i$  сечения элементов (вставок) с низким показателем преломления и расстояния между их осями  $\Lambda_i$ , называемое pitch [52–53]. Для рассматриваемых структур ИК-световодов важно, что шаг  $\Lambda_i$  не является периодом структуры  $\Lambda$ :  $\Lambda = \Lambda_i + d_i$ . Функция, пропорциональная соотношению  $d_i/\Lambda_i$  [54], называется долей заполнения волокна, а само соотношение – относительным размером отверстия [55]. Авторы [56] рассчитали, что для получения одномодового (в пределе – «бесконечно» одномодового) кварцевого волокна значение относительного размера должно быть меньше 0,15. Авторы [57] заявили о «бесконечно» одномодовом волокне при вдвое меньшем значении. Авторы [58] оговаривают значение порядка 0,40.

При таком же  $d_i/\Lambda_i$  авторы [59] получили уже галогенидсеребряное волокно, однако без одномодового режима работы. Одномодовая структура была получена ими при  $d_i/\Lambda_i = 0,60$ , но для большего числа колец вставок [59], чем планировалось нами. На основании рассмотренных литературных источников для моделирования и создания волокна на основе систем AgCl – AgBr, AgBr – TlI был выбран диапазон  $d_i/\Lambda_i = 0,15 \dots 0,45$  с шагом 0,05. Конкретные значения диаметра вставок  $d_i$  и шага  $\Lambda_i$  рассчитываются исходя из геометрии расположения вставок вокруг центральной оси волокна.

### ***1.3.3. Моделирование структуры световода***

Фотонная структура волокон в данном случае была представлена, во-первых, одним и двумя кольцами периферических (кольцевых) вставок. Рассмотрение большего количества вставок представлялось затруднительным как с точки зрения моделирования, так и с точки зрения получения, так как технология получения галогенидсеребряных кристаллических волокон относительно дорогостоящая и недостаточно отработана в плане воспроизводимости. Во-вторых, рассматривалось гекса- и октагональное расположение вставок вокруг продольной оси. Если гексагональное расположение вполне интуитивно вследствие наибольшей эффективности заполнения предложенной площади, то октагональное размещение теоретически обещает расширить порог одномодовости волокон. Так, несмотря на то, что все рассматриваемые волокна являются сборкой из твердых элементов (all-solid), мы выделили hollow-core fiber (НС, волокно с «поллой» сердцевиной), являющееся простейшим частным случаем так называемого low-index-core fiber (волокна с низким показателем преломления в сердцевине), но со вставкой вместо традиционного воздушного отверстия; solid-core fiber (SC, волокно с «твердой» сердцевинкой), являющееся простейшим случаем large-mode-area fiber (волокна с большой площадью поля моды) и имеющее так называемый центральный дефект, относительно НС ФКС в виде отсутствия центральной вставки (подобная геометрия для случая больших диаметров сердцевины описывалась в статье [60] и называлась leakage channel fibers – волокна с каналом утечки); наконец, active-core fiber (АС, волокно с активной сердцевиной), схожее по внешнему виду с НС, но имеющее центральную вставку из оптически более плотного материала и, соответственно, иной профиль показателя

преломления. Под термином «active-core» в данном случае подразумевается специальное изменение показателя преломления центральной части волокна [61–63].

Для наглядности доля заполнения для всех структур FF представлена на рис. 1.1. Видно, что октагональная ориентация вставок повышает FF, что находится в согласии с [64]. Значения коэффициента  $a$  были получены в приближении, что доля заполнения – это отношение суммарной площади вставок  $A_i$  к суммарной площади ячеек  $A_{\text{cell}}$ , в узлах которых находятся вставки:  $FF = A_i / A_{\text{cell}} = a(d_i / \Lambda_i)^2$  [64]. Очевидно, в расчете не учитывается монолитная периферическая часть волокна, не дающая вклад в поддержание мод. Значения площадей указаны в табл. 1.1.

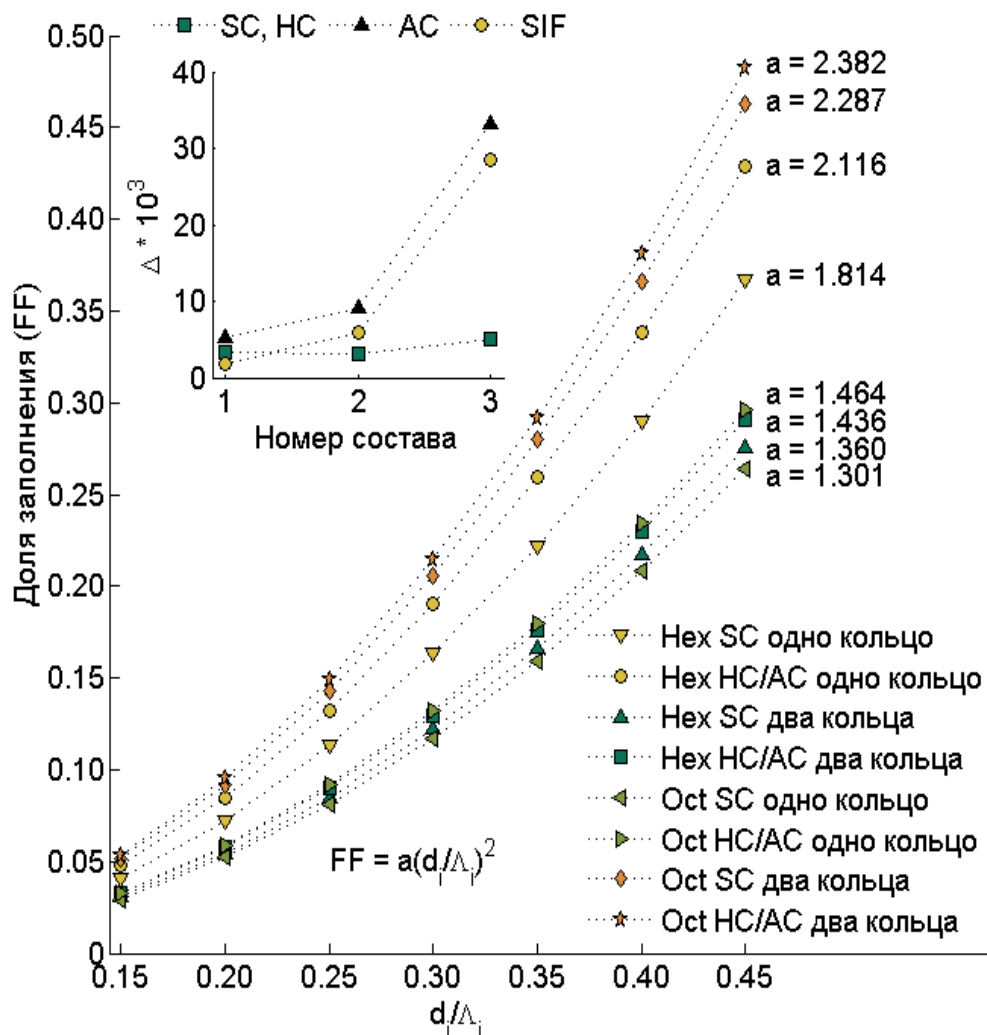


Рис. 1.1. Зависимость доли заполнения от относительного размера вставок. Для каждого случая указан старший коэффициент  $a$ . Вставка: относительная разность показателей преломления  $\Delta$  моделируемых структур

Таблица 1.1

Значения площади вставок  $A_i$  и полной площади микроструктуры  $A_{\text{cell}}$  для рассмотренных геометрий профиля

Профиль	$A_i$ [мкм <sup>2</sup> ]	$A_{\text{cell}}$ [мкм <sup>2</sup> ]	Профиль	$A_i$ [мкм <sup>2</sup> ]	$A_{\text{cell}}$ [мкм <sup>2</sup> ]
Hex SC, одно кольцо	$\frac{3\pi}{2} d_i^2$	$\frac{3\sqrt{3}}{2} \Lambda_i^2$	Oct SC, одно кольцо	$2\pi d_i^2$	$2(1 + \sqrt{2}) \Lambda_i^2$
Hex НС / АС, одно кольцо	$\frac{7\pi}{4} d_i^2$		Oct НС / АС, одно кольцо	$\frac{9\pi}{4} d_i^2$	
Hex SC, два кольца	$\frac{9\pi}{2} d_i^2$	$6\sqrt{3} \Lambda_i^2$	Oct SC, два кольца	$6\pi d_i^2$	$(4 + 3\sqrt{2}) \Lambda_i^2$
Hex НС / АС, два кольца	$\frac{19\pi}{4} d_i^2$		Oct НС / АС, два кольца	$\frac{25\pi}{4} d_i^2$	

Располагая набором показателей преломления на 10,6 мкм для различных содержаний бромида серебра в AgCl – AgBr и монойодида таллия в AgBr – TlI [65], мы разбили эти составы на группы по три состава каждая так, что первый показатель преломления в каждой группе соответствовал периферическим вставкам ФКС, второй – матрице, третий – центральным вставкам АС профиля. Относительная разность этих показателей преломления ( $\Delta = \Delta n / n_{\text{m(ci)}}$ ), где  $\Delta n = n_{\text{m(ci)}} - n_i$ , представлена на врезке на рис. 1.1. Видно, что на модовый состав в конечном итоге могут повлиять разные значения не только самих показателей преломления, но и их непостоянной разности.

#### 1.3.4. Фазовая диаграмма и критерий «отсечки»

Каждое значение относительного размера вставки может быть отмечено на так называемой фазовой диаграмме [58, 66–70], которая связывает длину волны проходящего излучения с диаметром вставок и межвставочным расстоянием. На рис. 1.2 представлена фазовая диаграмма для кварцевых волокон с относительным размером вставки  $d_i/\Lambda_i$  от 0,15...0,25 до 0,45, при диаметрах вставок от 8,10 до 29,0 мкм для гексагональной симметрии и от 5,6 до 19,0 мкм для

октагональной (октагон отмечен кружкам, гексагон – квадратами). Диаграмма, являющаяся графиком зависимости  $\lambda/\Lambda_i$  от  $d_i/\Lambda_i$ , визуализирует критерий для отсечки мод высших порядков, т. е. переход от многомодового режима к одномодовому, а также к «бесконечно» одномодовому. В масштабе, принятом для рис. 1.2, границей раздела первого и третьего режимов является кривая 1, тогда как при фиксированной длине волны в 10,6 мкм точки лежат на кривых 2 и 3 в случае гексагонального и октагонального расположения вставок соответственно.

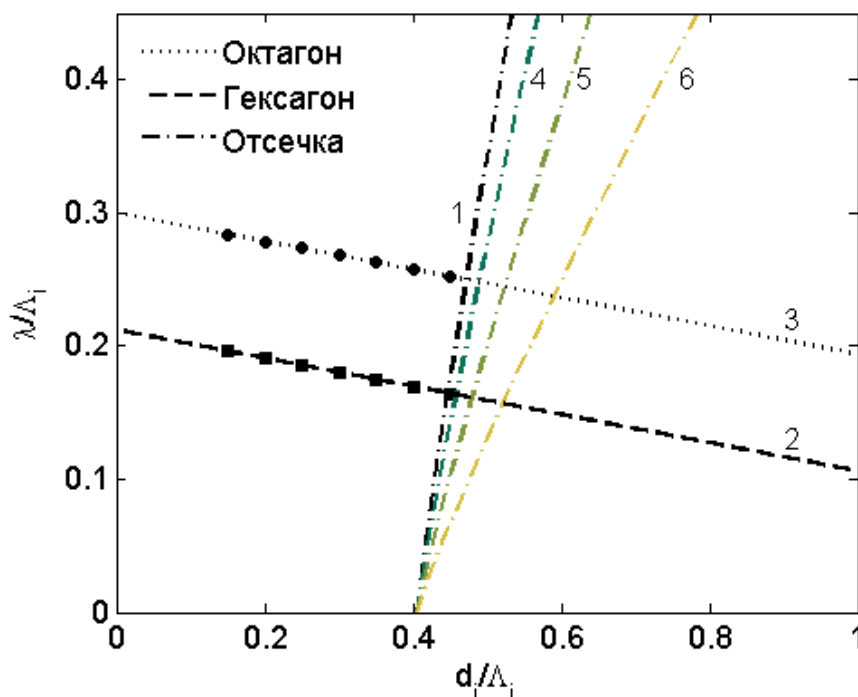


Рис. 1.2. Фазовая диаграмма «бесконечный» одномодовый режим – многомодовый режим: 1 – граница раздела (отсечки); 2 и 3 – прямые, содержащие экспериментальные точки, при варьировании относительного размера вставки; 4 и 6 – кривые перехода от SC к AC

Существующая зависимость для параметров отсечки рассчитана для кварцевых волокон [56, 57, 71]. Ренверсез [68] же предложил добавить в формулу Кульмея [66] множитель, учитывающий в том числе возможность создания ФКС из иных материалов:

$$(\lambda/\Lambda_i) = 2,80(d_i/\Lambda_i - 0,406)^{0,89} \sqrt{\frac{(n_{m,eff,1}^2 - n_{i,1}^2)}{(n_{m,eff,2}^2 - n_{i,2}^2)}}, \quad (1.5)$$

где  $n_{m,eff,j}$  и  $n_{i,j}$  – эффективные показатели преломления матрицы и вставок при переходе от одного химического состава (подстрочный индекс 1) к другому составу (индекс 2). При переходе от SC к AC граница в

области бóльших нормализованных длин волн сдвигается вправо (кривые 4 – 6 на рис. 1.2). В нашем случае это теоретическое приближение очень примерное, хоть и показательное, так как эффективная сердцевина АС ФКС в принятой нами терминологии состоит из двух материалов ( $n_m$ ,  $n_{ci}$ ), а не одного. При обратном переходе граница сдвигается влево, и осью симметрии является кривая 1. В пределах же одной структуры и при переходе между составами возрастание (убывание) функции становится круче (на графике не показано). Абсцисса отсечки четко определена [66] и не сдвигается с изменением состава [69]. Как видно, при достаточном количестве вставок микроструктуры для наших составов можно ожидать одномодовый режим работы.

Для инфракрасных световодов методикой SMT был смоделирован модовый состав на длине волны 10,6 мкм. При получении его как минимум для каждой моды низшего порядка была оценена эффективная площадь моды  $A_{eff}$ . Для этого мы использовали картины распределения соответствующей продольной компоненты вектора Пойнтинга  $S_z$  по сечению волокна. При этом использовалась только та площадь, интенсивность света  $I$  на которой удовлетворяла неравенству для гауссового пучка  $I \geq I_{max} / e^2$ , где  $I_{max}$  – максимальное значение интенсивности данной моды в данном сечении [59, 69, 72]. Также были смоделированы SIF-волокна – образцы сравнения, показатели преломления сердцевин  $n_{core}$  и оболочек  $n_{clad}$  которых были равны показателям преломления центральной вставки АС ФКС  $n_{ci}$  и матрицы всех ФКС  $n_m$  соответственно, а диаметр сердцевин  $d_{core}$  был равен соответствующим диаметрам центральных вставок АС (НС) ФКС –  $d_{ci}$ .

### ***1.3.5. Результаты моделирования модового состава и критерии отбора***

Результатами моделирования модового состава волокна являются картины распространения излучения в поперечном сечении волокна, которые могут быть представлены проекциями отдельных компонентов электромагнитного поля ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ) либо упомянутым ранее вектором Пойнтинга  $S_z$ , а также эффективные показатели преломления проходящих мод. По результатам моделирования необходимо построить графики, отражающие зависимость эффективной площади поля моды от относительного размера вставки. Сравнивая структуры с

разной долей заполнения, составом, количеством колец вставок и количеством самих вставок, можем выявить геометрии, поддерживающие одну фундаментальную моду. Например, для ФКС на основе твердых растворов системы AgCl – AgBr, AgBr – ТП был построен график, показанный на рис. 1.3. Конфигурации, поддерживающие фундаментальную моду, выделены окружностями на графике (см. рис. 1.3), на котором отображены площади всех найденных мод с указанием вида каждой моды с точки зрения классификации для линейно поляризованных мод  $LP_{lm}$  [73–74]. Индекс «X» означает, что условию  $I \geq I_{\max} / e^2$  удовлетворяют лишь несколько пикселей; индекс «a» при 11a – кольцевая мода с условными индексами 11 при  $l \rightarrow \infty$ ; индекс «b» обозначает деформацию моды под конкретную фотонную структуру; индекс «с» при 33с указывает на вращение внешнего ряда сегментов моды на  $\pi/3$  относительно предыдущего внутреннего ряда; стрелка говорит о некой переходной форме моды, обусловленной фотонной структурой. Окружностями отмечены предполагаемые одномодовые волокна, фундаментальная мода которых имеет тип  $LP_{01}$ . Горизонтальной чертой выделен экстремальный случай, когда мода занимает все пространство эффективной сердцевины диаметром 100 мкм.

По графикам на рис. 1.3 можно отобрать одномодовые волокна, в том числе и с увеличенным диаметром поля фундаментальной моды. По рис. 1.3 были отобраны две структуры составами: 1)  $AgCl_{0,25}Br_{0,75}$  ( $n = 2,123$ ),  $AgCl_{0,18}Br_{0,82}$  ( $n = 2,130$ ),  $AgCl_{0,16}Br_{0,84}$  ( $n = 2,134$ ); 2)  $AgCl$  ( $n = 1,987$ ),  $AgCl_{0,86}Br_{0,14}$  ( $n = 1,997$ ),  $AgCl_{0,60}Br_{0,40}$  ( $n = 2,055$ ). Обе оказались гексагональными АС ФКС с одним кольцом вставок. Максимальная интенсивность в данных структурах сосредоточена на продольной оси волокна (рис. 1.4, а и б). Моды SIF, имеющих такой же диаметр сердцевины, что и центральные вставки найденных АС ФКС, отличаются от мод ФКС по площади на 51 % в меньшую сторону для АС. В целом фундаментальная мода  $LP_{01}$  оказалась характерной только для АС ФКС, что является следствием действия механизмов ПВО и ФЗЗ.



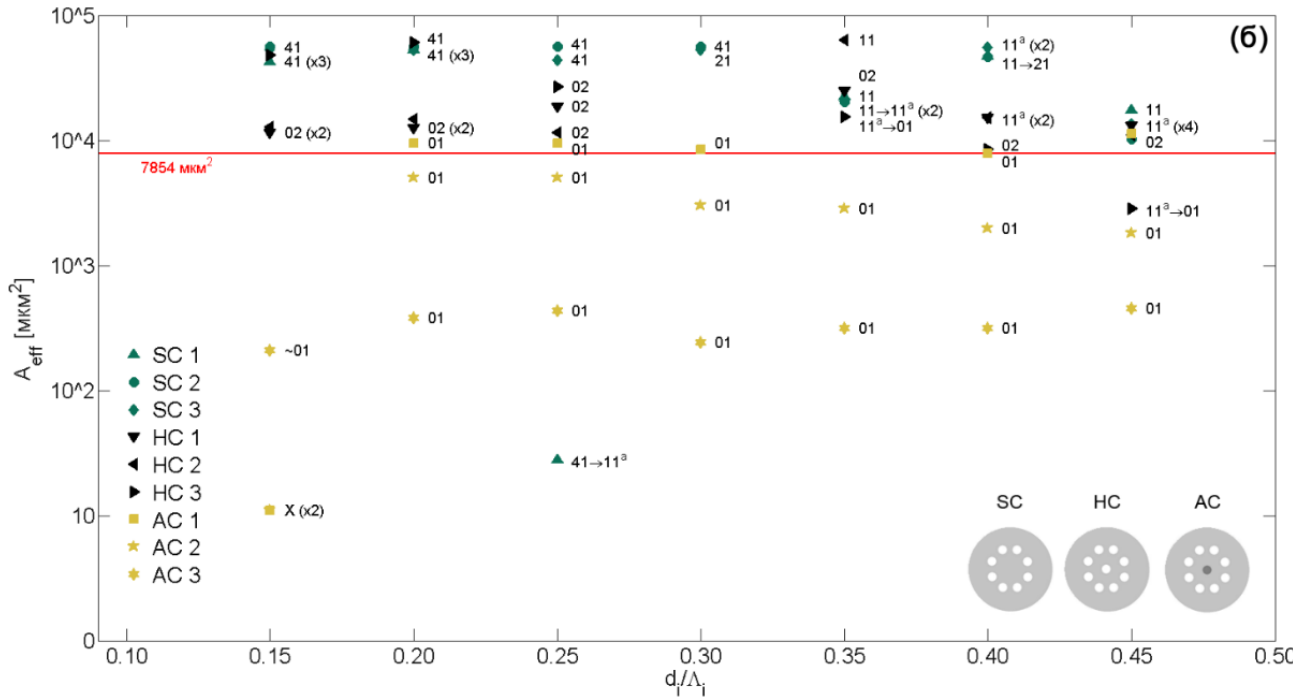
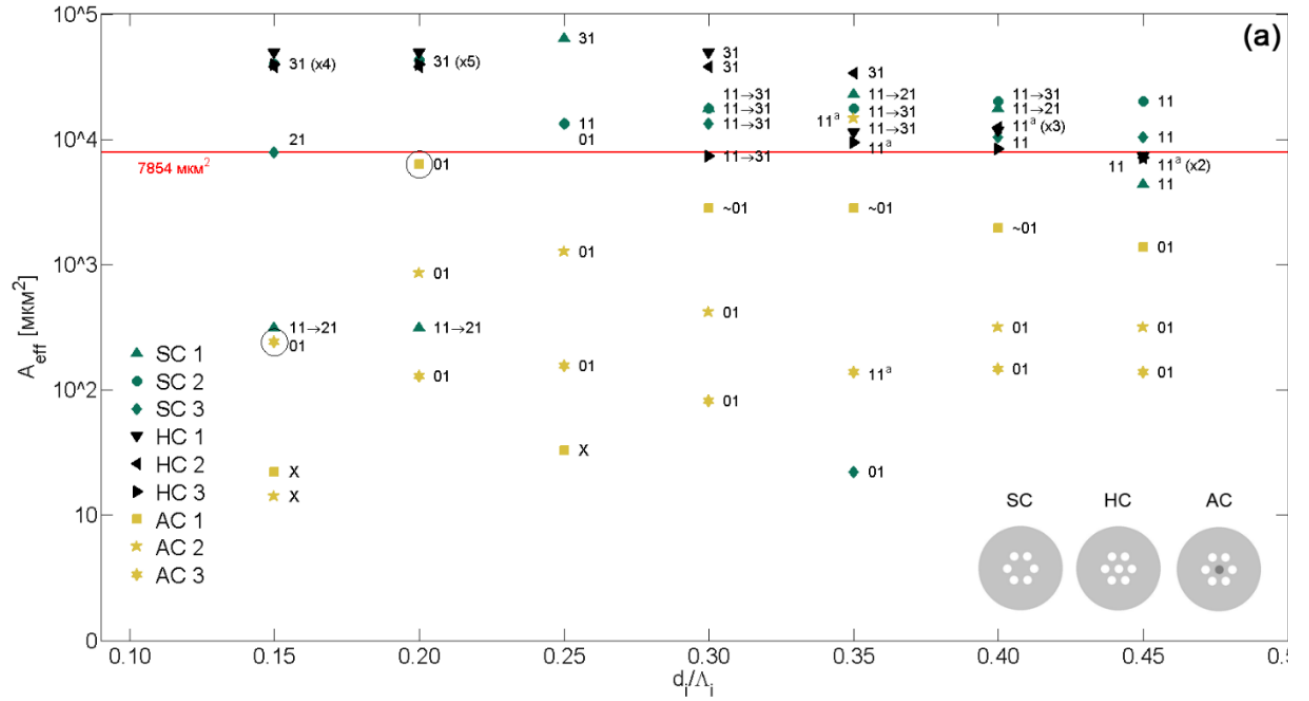
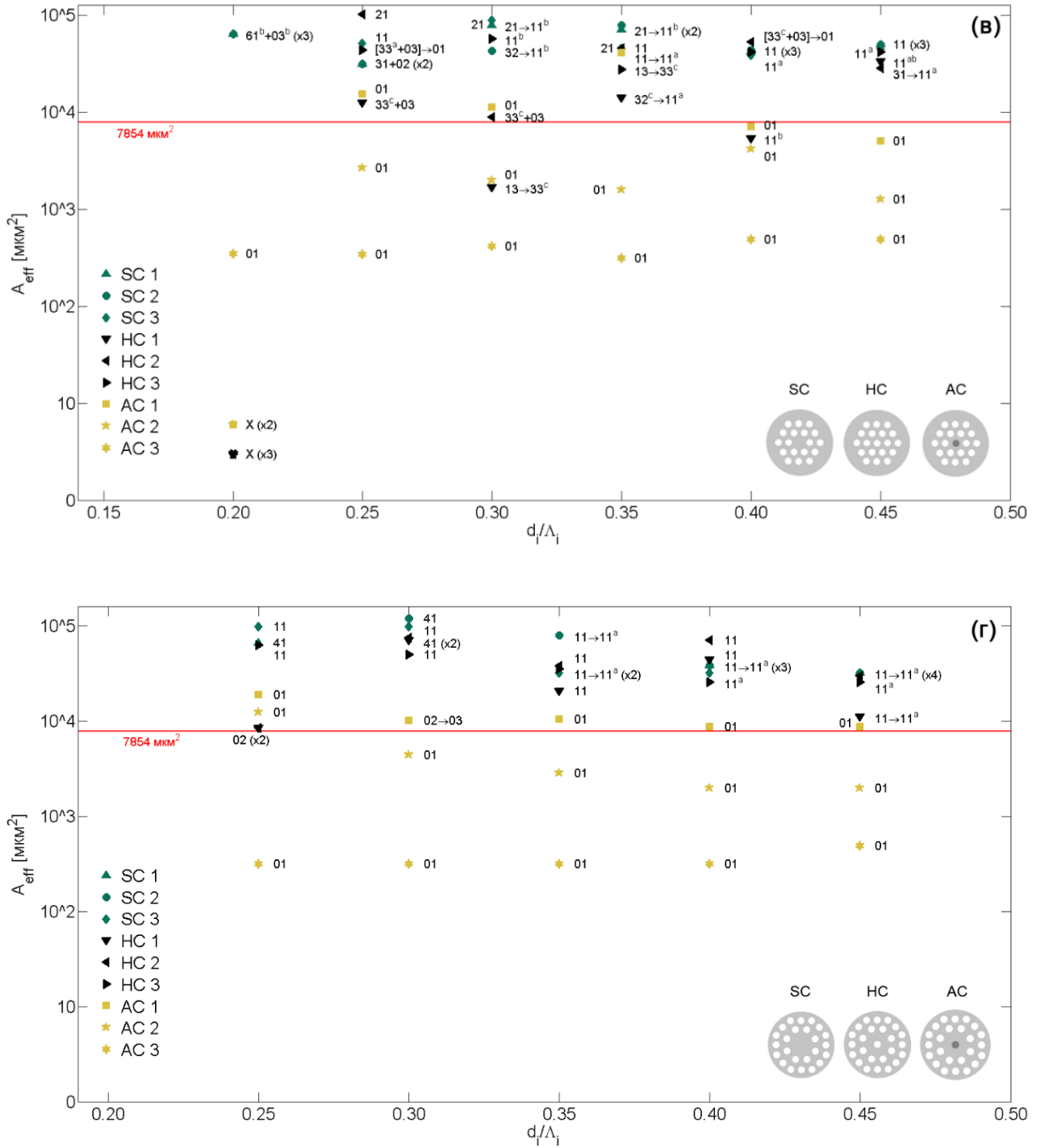


Рис. 1.3. Нескорректированная эффективная площадь  $A_{\text{eff}}$  найденных мод низшего порядка с указанием LP классификации каждой моды: (а) и (б) – Нех и Ост с одним кольцом; (в) и (г) – Нех и Ост с двумя кольцами



Для гексагона с одним кольцом вставок и для обоих видов АС октагона в большинстве случаев моде  $LP_{01}$  сопутствует большое количество высших мод, так как разница показателей преломления между центром и периферией велика, если сравнивать с SC-структурой, а микроструктура, которая должна помогать избегать зависимости режима от состава, недостаточно идеальна для отсекаания высших мод. В

модовом наборе часто встречаются кольцевые моды либо  $LP_{11}$ , адаптирующиеся под конкретную микроструктуру. Большое количество колец вставок в волокне помогает добиваться наличия  $LP_{01}$  моды в большинстве случаев, но ее эффективная площадь уменьшается, а проблема наличия высших мод не всегда решается. SC-структуры, передающие излучение за счет механизма полного внутреннего отражения, обладают меньшей разницей между эффективной сердцевиной и вставками, но ПВО недостаточно для фокусировки излучения в центре. Превалирующая симметрия мод –  $LP_{11}$ , где  $l$  в основном изменяется от 1 до 3 (4) для гексагона (октагона) и до 6 (8) для большего числа вставок. Наименьшая разность показателей преломления и наименьшее количество мод – у НС-геометрии, но несовершенная фотонная микроструктура снова не позволяет поддерживать  $LP_{01}$  монополь. При этом площадь моды для этих структур наибольшая, хоть и при сравнительно низкой номинальной интенсивности света.

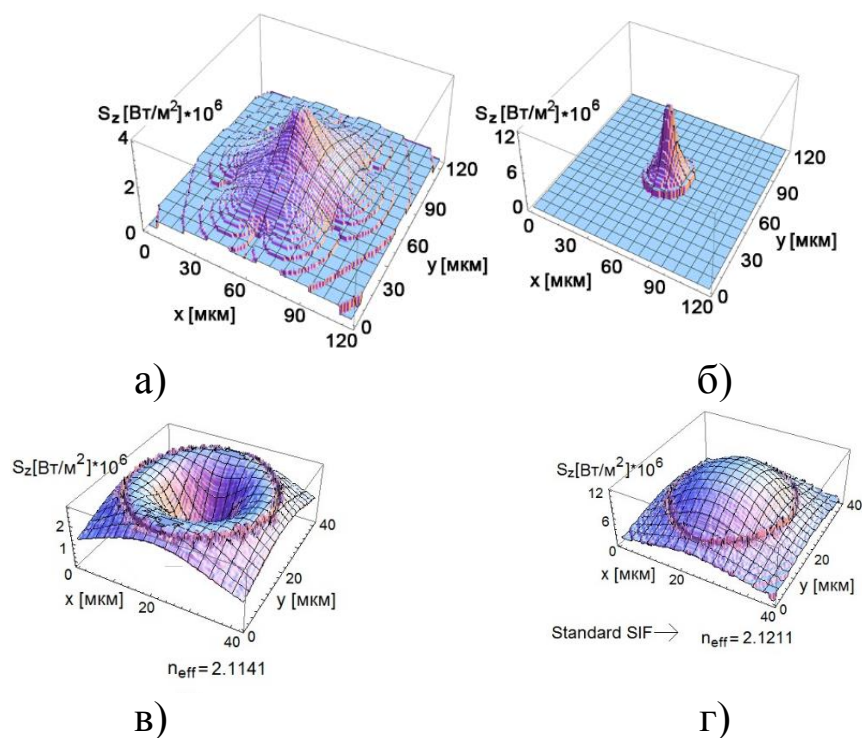


Рис. 1.4. Фундаментальный модовый состав потенциальных одномодовых геометрий Нех АС ФКС (3D-модели): Нех АС ФКС,  $d_i / \Lambda_i = 0,2$ , 1<sup>st</sup> composition,  $n_{eff} = 2,130478$  (а); Нех АС ФКС,  $d_i / \Lambda_i = 0,1$ , 2<sup>nd</sup> composition,  $n_{eff} = 2,003263$  (б). Стандартного двухслойного SIF с  $d_{core} = 28,2$  мкм (две моды в, г),  $\lambda = 10,6$  мкм. Модель подразумевает содержание бромида серебра в  $AgCl_{1-x}Br_x$ , мол. %: 75,0 для матрицы АС ФКС; 82,0 для вставок АС ФКС и оболочки SIF; 84,0 для центральной вставки АС ФКС и сердцевины SIF

Количество мод ФКС ( $N_{\text{modes}}$ ) в сравнении со всеми возможными модами SIF изображено в зависимости от относительного размера на рис. 1.5. Видно, что большее количество мод соответствует волокнам с большими значениями показателей преломления элементов и большими значениями относительной и абсолютной их разности. В связи с этим в ФКС происходит увеличение  $N_{\text{modes}}$  с ростом  $d_i/\Lambda_i$  и поддерживается больше мод, чем в SIF-волокнах.

Для значения  $N_{\text{modes}} = 1$  на рис. 1.6, а и б дана зависимость процента одномодовых волокон от состава (т. е. показателей преломления и их разности) и типа структуры. По полотну для гексагональной структуры на рис. 1.6, а видно, что наибольшее количество одномодовых волокон – это АС- и НС-структуры с одним рядом вставок и составами  $\text{AgBr}$  ( $n = 2,166$ ),  $\text{Ag}_{0,99}\text{Ti}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$  ( $n = 2,173$ ),  $\text{Ag}_{0,98}\text{Ti}_{0,02}\text{Br}_{0,98}\text{I}_{0,02}$  ( $n = 2,186$ ); и  $\text{AgCl}$  ( $n = 1,987$ ),  $\text{AgCl}_{0,86}\text{Br}_{0,14}$  ( $n = 1,997$ ),  $\text{AgCl}_{0,60}\text{Br}_{0,40}$  ( $n = 2,055$ ), что довольно интересно, так как в случае SIF одномодовый режим характерен для меньшей разности показателей преломления.

Эта же область на графике для октагона почти полностью лежит на уровне нуля (рис. 1.6, б). Примечательно, что модовый состав АС ФКС третьего химического состава, особенно октагональной структуры, всегда включает до 100 % мод  $\text{LP}_{01}$  (рис. 1.6, в), но при этом всегда поддерживается от 1 до 16 низших мод. Одномодовый режим в данном случае не подразумевает наличие монополи  $\text{LP}_{01}$ , о чем и можно судить по рис. 1.5. Для НС- и SC-структур эта мода вообще не была выявлена.

Для пояснения сравнения SIF и ФКС с гексагональной структурой приведён пример моделирования одномодовых ИК-световодов, предназначенных для работы на длине волны 10,6 мкм. Выполнено сравнение двухслойного световода с диаметром сердцевины 11,1 мкм, работающего на принципе полного внутреннего отражения, а также волокна с фотонной структурой, геометрический профиль которого имеет центральную вставку диаметром 11,1 мкм и шесть периферических вставок диаметром 11,1 мкм, расположенных вокруг неё с расстоянием между центрами в 55,5 мкм (рис. 1.7).

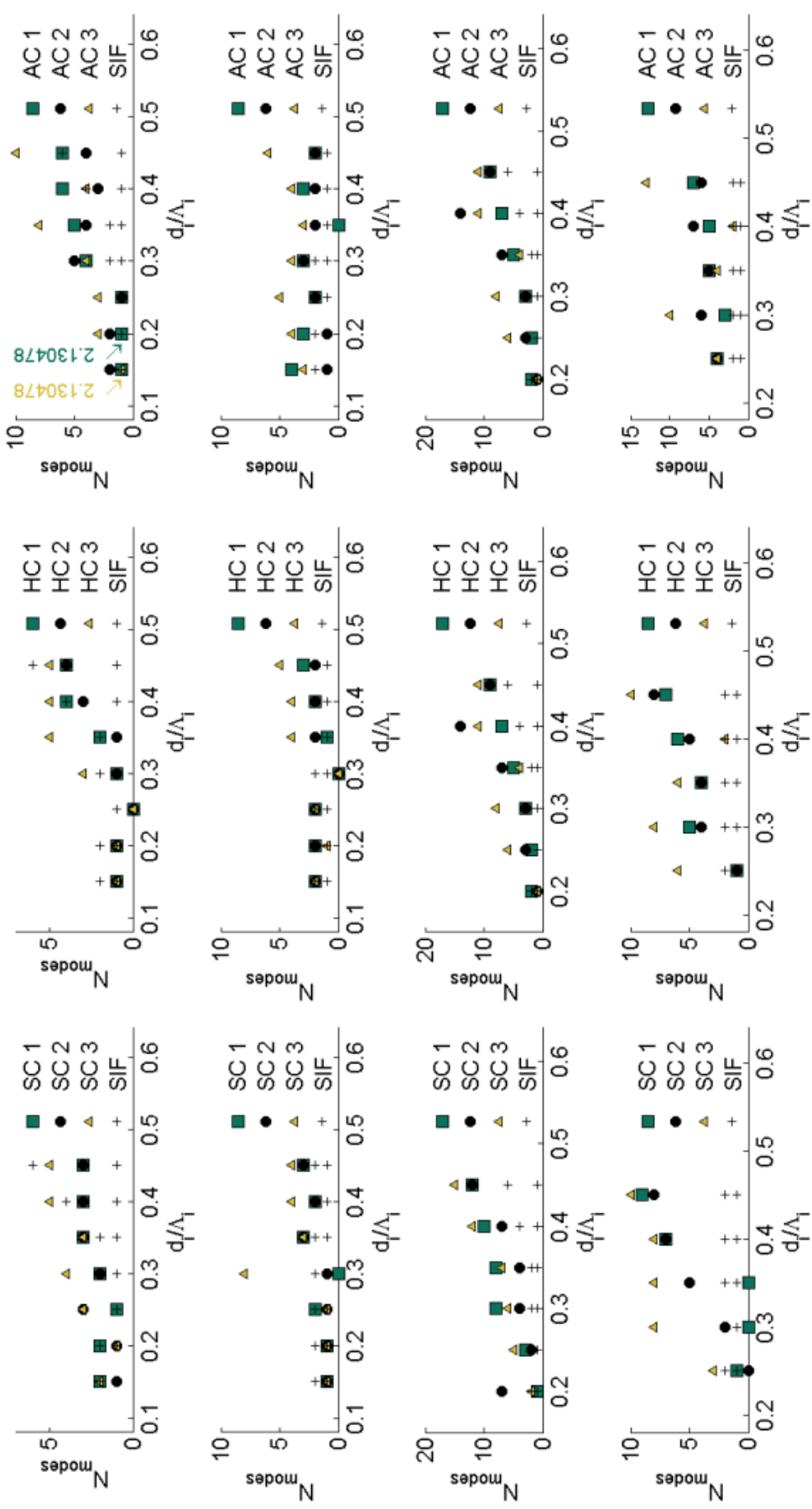


Рис. 1.5. Количество мод для всех смоделированных ФКС (затитые маркеры) в сравнении с соответствующими SIF, для которых  $\text{pscore}$ ,  $\text{SIF} = \text{psi}$ , AC ФКС и  $\text{dscore}$ ,  $\text{SIF} = \text{dci}$ , AC ФКС (плюсики, отдельные составы не разнесены). Строки сверху вниз: гексагон с одним кольцом вставок, такой же октагон, гексагон с двумя кольцами вставок, такой же октагон. Столбцы слева направо: SC-, HC-, AC-структуры. Для одномодовых кандидатов указан эффективный показатель преломления

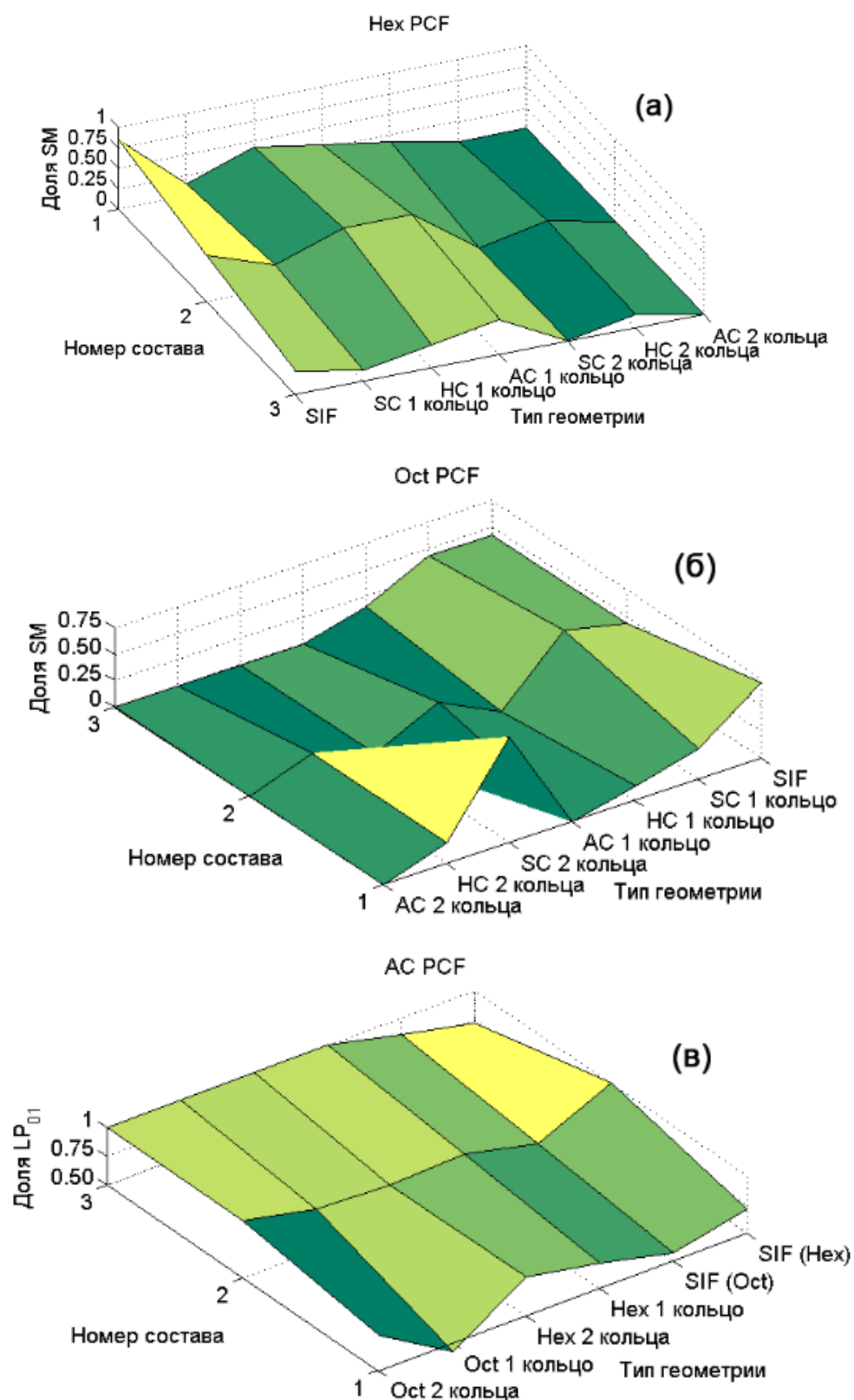


Рис. 1.6. Доля одномодовых (SM) ФКС с гексагональной (а) и октагональной (б) микроструктурой и доля фундаментальной LP<sub>01</sub> моды, характерной для active-core fiber (в), как функции состава волокна и его геометрии; SIF – двухслойные волокна, для которых справедливо  $d_{core}, SIF = d_{cl}$ , AC ФКС

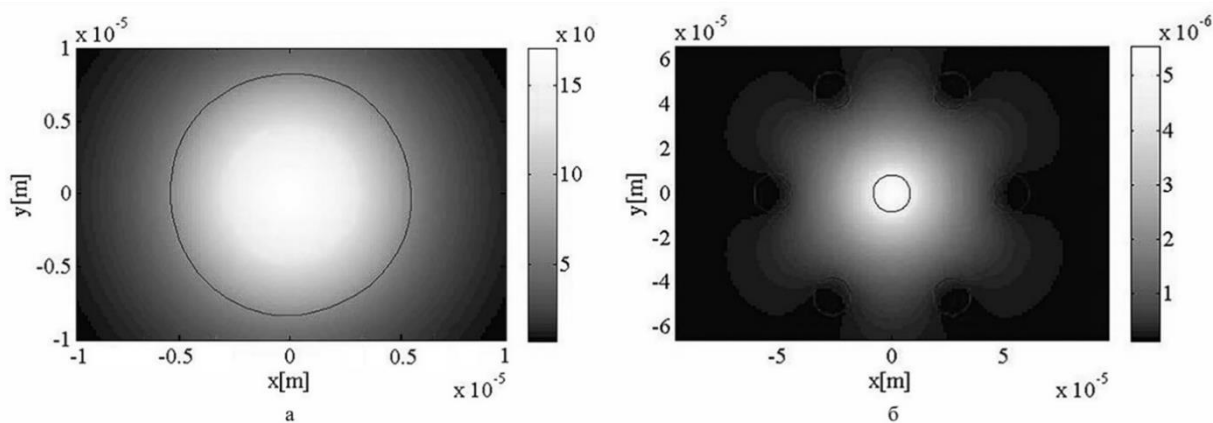


Рис. 1.7. Результаты моделирования световодов на основе твёрдых растворов галогенидов серебра: а) одномодовый двухслойный световод с диаметром поля моды 25 мкм; б) одномодовый ФКС с расположенными в гексагональном порядке вставками и диаметром поля моды 100 мкм

Смоделированная структура ФКС позволяет увеличить размер диаметра фундаментальной моды до значения в 100 мкм. Диаметр поля моды оценивался как отношение  $I_z^{\max} / e_2$ . Вклад периферических вставок в расширение диаметра поля фундаментальной моды подтверждается тем обстоятельством, что смоделированное двухслойное волокно с сердцевинной 11,1 мкм и аналогичными значениями показателей преломления сердцевинны и оболочки имеет диаметр фундаментальной моды 25 мкм. Составы элементов ФКС (мол. %): в матрице AgBr – 82, AgCl – 18 ( $n = 2,130$ ); во вставках периферии AgBr – 75, AgCl – 25 ( $n = 2,123$ ); в центральной вставке AgBr – 84, AgCl – 16 ( $n = 2,134$ ). Состав сердцевинны двухслойного световода (мол. %): AgBr – 84, AgCl – 16 ( $n = 2,134$ ); оболочки AgBr – 82, AgCl – 18 ( $n = 2,130$ ).

### 1.3.6. Определение радиуса поля фундаментальной моды

По результатам моделирования, помимо картины распространения интенсивности излучения в поперечном сечении волокна, становятся известными эффективные показатели преломления  $n_{\text{eff}}$  каждой моды. При известных эффективных показателях преломления на основании приближения Мортенсена [75] для числовой апертуры эффективная площадь моды определяется как

$$A_{\text{eff}} \approx \frac{\lambda^2}{\pi} \left( \frac{1}{n_{1,\text{eff}}^2 - n_{2,\text{eff}}^2} - 1 \right), \quad (1.6)$$

где  $n_{j,\text{eff}}$  — зависящие от длины волны эффективные показатели преломления фундаментальной моды и следующей за ней (не считая поляризованной в перпендикулярной плоскости), называемой space-filling mode (FSM, заполняющая пространство мода) [57, 75]. Если представить ее показатель преломления через константу распространения  $\beta_2$  и волновое число  $k = 2\pi / \lambda$ , обратное длине волны, через  $n_{2,\text{eff}} = \beta_2 / k$ , то FSM будет модой со следующей по величине  $\beta$  при постоянном  $k$ . Представив радиус фундаментальной моды в виде  $w = (A_{\text{eff}} / \pi)^{1/2}$ , можно получить даже более точное изменение геометрии моды с ростом доли заполнения, чем было снято с картин распределения интенсивности света в SMT.

### 1.3.7. Нормированная частота

Модовый состав связан с V-параметром (или так называемой нормированной частотой), который определяет режим работы волокна и который мы рассчитывали для всех структур по формуле для микроструктурированного волокна [57, 58]

$$V = 2\pi\Lambda_i \sqrt{\frac{n_{1,\text{eff}}^2 - n_{2,\text{eff}}^2}{\lambda}}. \quad (1.7)$$

Как говорилось выше,  $n_{j,\text{eff}}$  — зависящие от длины волны эффективные показатели преломления фундаментальной моды ( $j = 1$ ) и FSM ( $j = 2$ ). Получившиеся в некоторых случаях строго одномодовые структуры не поддерживали FSM, поэтому при расчете V-параметра грубо принимается ее показатель преломления за показатель преломления вставок. Подобное упрощение выгоднее альтернативных приближений: за искомую пару показателей преломления нельзя взять показатели сердцевины и оболочки, так как не учитывается фотонная структура волокна, и нельзя взять показатели сердцевины и единственной моды, так как оба характеризуют сердцевину, а оболочечная мода отсутствует согласно моделированию. Как видно из формулы, после разложения разности квадратов под корнем V-параметр зависит как от разности показателей преломления, так и от самой их величины. Надо отметить, что идеальная фотонная структура волокна теоретически должна позволить V-параметру зависеть больше от геометрии, чем от показателей преломления [76, 77], что, однако, далеко не всегда выполняется в нашем случае, т. е. в случае малого количества вставок.



Определив  $V$ -параметр для всех ФКС, мы построили гистограммы, отображающие повторяемость  $N$  той или иной величины  $V$  для конкретной геометрии (рис. 1.8).

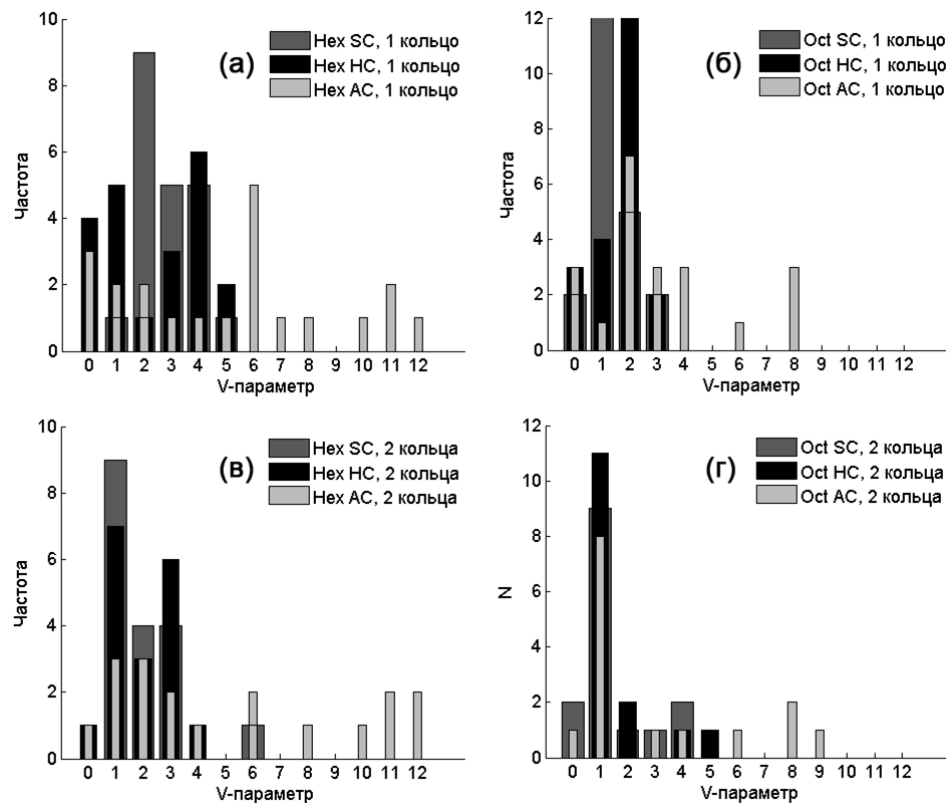


Рис. 1.8. Общие гистограммы распределения  $V$ -параметра в зависимости от геометрии профиля без разнесения по конкретным составам: а и б – гексагон и октагон с одним кольцом вставок; в и г – гексагон и октагон с двумя кольцами вставок

Для упрощения за отметку 0 взято значения  $V$  в промежутке от 0 до 1, не включая 1, и т. д. Таким образом, желаемое значение  $V = \pi$  [58] для наблюдения «отсечки» высших мод в ФКС, определенное для кварца, соответствует абсциссе 3. Например, для SIF значение отсечки равно  $V = 2,405$ , что соответствует абсциссе 2. Однако далеко не все фундаментальные моды имели симметрию  $LP_{01}$ , как говорилось выше. Аналогично не всем структурам, оказавшимся одномодовыми по результатам моделирования, соответствовало значение порядка  $\pi$ ; возможно, из-за грубости принятого ранее приближения для показателей преломления. Из рис. 1.8 видно, что наибольшее количество мод оказалось характерным для АС-структур, что и отмечалось ранее.

Кроме того, из диаграммы на рис. 1.8 можно заметить, что одномодовые режимы работы ФКС возможны и при  $V > \pi$ , однако это не означает пропускание моды низшего порядка. Таким образом, поиск

ФКС с одной фундаментальной модой является индивидуальной задачей для конкретной конфигурации и состава волокна.

## Выводы по главе 1

Среди существующих методов моделирования распространения излучения в диэлектрических волокнах наиболее применимыми являются методы: конечных элементов (finite element method – FEM), исходной модели (source-model technique – SMT), плоских волн (pulse width modulation – PWM) и слабого наведения (equivalent input modulation – EIM). Данные подходы наиболее часто применяются в программных пакетах, так как позволяют быстро и точно выполнять симуляцию. Среди всех методов для симуляции фотонно-кристаллических световодов наиболее подходящими являются FEM и SMT, так как они позволяют моделировать сложные структуры с несколькими кольцевыми вставками круговой и произвольной формы с высокой точностью. Для моделирования волокон на основе твердых растворов галогенидов серебра и таллия была выбрана методика SMT, поскольку данный подход более точно рассчитывает структуру с вставками произвольной формы при малых затратах вычислительных и временных ресурсов.

Моделирование на основе данной методики осуществляется в программе SMTP, интегрированной в Matlab. В данной главе приведены основные входные и выходные параметры моделирования, а также алгоритм расчета.

По итогам моделирования могут быть получены картины распространения как интенсивности излучения в поперечном сечении волокна (вектор Пойнтинга), так и отдельных векторов ЭМ-поля ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $E_x$ ,  $E_y$ ), модовый состав световода, эффективные показатели преломления. Данные параметры позволяют определить радиусы поля фундаментальной моды, нормированную частоту и сформировать критерии отбора одномодовых волокон.

Критерии отбора требуют дополнительного построения диаграмм, приведенных в данной главе, таких как фазовая диаграмма отсечки, графики зависимости количества мод от длины волны и V-параметра, и позволяют подобрать входные данные для получения ФКС с увеличенным полем фундаментальной моды.

### Задачи

1. По фотонно-кристаллическому световоду гексагональной структуры с диаметром сердцевины  $D$  проходит излучение с длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм. Известно, что ФКС передает две моды излучения с эффективными показателями преломления  $n_{\text{eff},1}$ ,  $n_{\text{eff},2}$ . Определите нормированную частоту и эффективную площадь моды заданного световода.

Данные для задачи 1

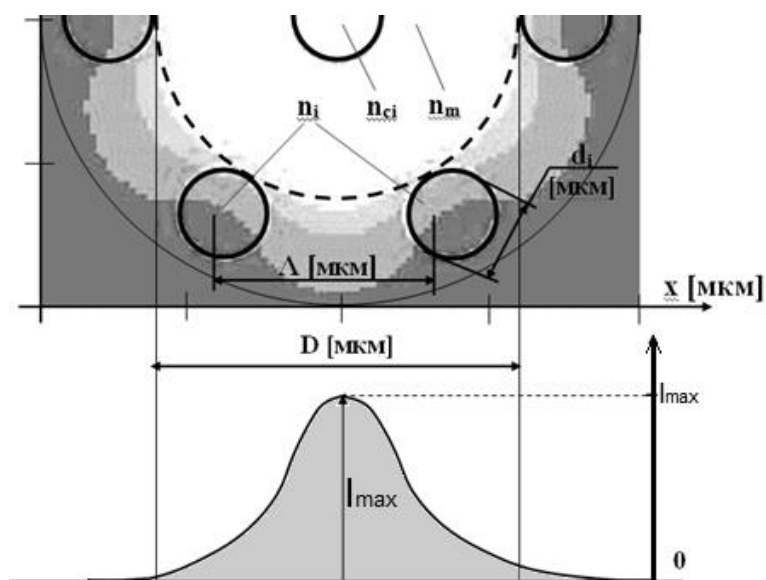
№ варианта	$D$ , мкм	$n_{\text{eff},1}$	$n_{\text{eff},2}$
1	100	2,161	2,156
2	120	2,162	2,160
3	100	2,164	2,159
4	120	2,161	2,160
5	100	2,156	2,149
6	120	2,159	2,157
7	100	2,164	2,162
8	120	2,152	2,149
9	100	2,161	2,159
10	120	2,161	2,149

2. В результате исследования выходного излучения из ФКС гексагональной структуры с диаметром сердцевины  $D$  был получен профиль распределения излучения, представленный на рис.

Известно, что интенсивность излучения эффективной площади моды равна

$$I = \frac{I_{\text{max}}}{e^2}.$$

Определите приблизительное значение эффективной площади поля моды.



Распределение излучения в поперечном сечении ФКС

### Данные для задачи 2

№ варианта	D, мкм	$I_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup>
1	50	$12,4 \cdot 10^{-6}$
2	100	$16,3 \cdot 10^{-6}$
3	120	$1,8 \cdot 10^{-5}$
4	160	$15,1 \cdot 10^{-5}$
5	200	$17,6 \cdot 10^{-5}$
6	50	$8,4 \cdot 10^{-6}$
7	100	$12,5 \cdot 10^{-6}$
8	120	$6,9 \cdot 10^{-5}$
9	160	$14,8 \cdot 10^{-5}$
10	200	$2,2 \cdot 10^{-4}$

### Библиографический список

1. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation / T. P. Wite [et al.] // J. Opt. Soc. Am. B. — 2002. — Vol. 19. — P. 2322-2330.
2. Broeng, D. Photonic crystal fibers: a new class of optical waveguide / D. Broeng // Opt. Fiber Technol. — 1999. — Vol. 5. — P. 305-330.

3. Richardson, D. J. High power fiber lasers: current status and future perspectives / D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson // J. Opt. Soc. Am. B. — 2010. — Vol. 27, № 11. — P. B63-B92.
4. Ballato, J. Materials development for next generation optical fiber / J. Ballato, P. Dragic // Materials. — 2014. — Vol. 7. — P. 4411-4430.
5. Nielsen, M. D. Photonic crystal fiber with an effective area of 600  $\mu\text{m}^2$  and low bending loss / M. D. Nielsen, J. R. Folkenberg, N. A. Mortensen // Electron. Lett. — 2003. — Vol. 39, № 25. — P. 1802-1803.
6. Large mode area multi-trench fiber with delocalization of higher order modes / D. Jain [et al.] // J. Selected Topics in Quant. Electronics. — 2014. — Vol. 20, № 5. — P. 0902909.
7. Silver halide photonic crystal fibers for the middle infrared / E. Rave [et al.] // Appl. Opt. — 2004. — Vol. 43, № 11. — P. 2236-2241.
8. Altman, Z. Cutoff frequencies of dielectric waveguides using the multifilament current model / Z. Altman, H. Cory, Y. Leviatan // Microwave Optic Technologies Letters — 1990. — Vol. 3 — P. 294-295.
9. Low-loss, 2 km-long photonic crystal fiber with zero GVD in the near IR suitable for picosecond pulse propagation at the 800 nm band / H. Kubota, K. Suzuki, S. Kawanishi [et.al.] // Paper of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2001), OSA Trends in Optics and Photonics. — 2001. — Vol. 55. — Paper CPD3.
10. Mogilevtsev, D. Group velocity dispersion in photonic crystal fibers / D. Mogilevtsev, T. A. Birks, P. St. J. Russell // Opt. Lett. — 1998. — № 23. — P. 1662-1664.
11. Yamashita, E. Modal analysis method for optical fibers with symmetrically distributed multiple cores / E. Yamashita, S. Ozeki, K. Atsuki // J. Lightwave Technolgy. — 1985. — № 3. — P. 341-345.
12. Yamashita, E. Analysis methods for electromagnetic wave problems / E. Yamashita. — London : Artech House, 1990. — 414 p.
13. Structure design of submarine optical fiber cable / T. Yabuta, K. Yamashita, O. Kawata [et.al.] // OSA Technical Digest. — 1981. — P. MD2.
14. McIsaac, P. R. Symmetry-induced modal characteristics of uniform waveguides – I: Summary of results / P. R. McIsaac // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. — 1975. — Vol. 23. — P. 421-429
15. Hochman, A. Analysis of strictly bound modes in photonic crystal fibers by use of a source-model technique / A. Hochman, Y. Leviatan //

- Journal of the Optical Society of America A. — 2004. — Vol. 21, № 5. — P.1073-1081.
16. Hochman, A. Calculation of confinement losses in photonic crystal fibers by use of a source-model technique / A. Hochman, Y. Leviatan // Journal of the Optical Society of America B. — 2005. — Vol.22, № 2. — P.474-480.
  17. Hochman, A. Modal dynamics in hollow-core photonic-crystal fibers with elliptical veins / A. Hochman, Y. Leviatan // Optics Express. — 2005. — Vol. 13, № 15. — P. 6193-6201.
  18. Hochman, A. Determination of a dielectric waveguide propagation constant using a multifilament-current model / A. Hochman // Optics Letters. — 1989. — Vol. 14, № 18 — P. 1026-1028.
  19. Altman, Z. Cutoff frequencies of dielectric waveguides using the multifilament current model / Z. Altman, H. Cory, Y. Leviatan // Microwave Opt. Technol. Lett. — 1990. — Vol. 3. — P. 294-295.
  20. Lin, X. E. Photonic band gap fiber accelerator / X. E. Lin // Phys. Rev. ST Accel. Beams. — 2001. — Vol. 4. — P. 051301.
  21. Comparison of different methods for rigorous modeling of photonic crystal fibers / M. Szpulak, W. Urbanczyk, A.Hochman [et. al.] // Opt. Express. — 2005. — Vol. 14. — P.5699-5714.
  22. Measurements of Temperature Sensitivity in Index-Guided Highly Birefringent Photonic Crystal Fibres / T. Martynkien, G. Statkiewicz, M. Szpulak [et.al.] // Optical Fiber Sensors. — 2005. — P. ThE65.
  23. Measurement of the group dispersion of the fundamental mode of holey fiber by white-light spectral interferometry / P. Hlubina, M. Szpulak, D. Ciprian [et.al.] // Optics Express. — 2005. — Vol. 15, № 18. — P. 11073-11081.
  24. Guidance in Kagome-like photonic crystal fibres I: analysis of an ideal fiber structure / L. Chen, G. J. Pearce, T. A. Birks [et.al.] // Optics Express. — 2011. — Vol. 19, № 7 — P. 6945-6955.
  25. All-Glass Large-Core Leakage Channel Fibers / L. Dong, T. Wu., Y. Li [et.al.] // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. — 2008. — Vol. 15, №. 1. — P. 47-53.
  26. Improved fully vectorial effective index method for photonic crystal fibers: evaluation and enhancement / Y. Li, Y. Yao, M. Hu [et.al.] // Applied Optics. — 2008. — Vol. 47, № 3 — P. 399-405.
  27. Rhombic core photonic crystal fiber for sensing applications: Modeling and analysis / Md. Sh. Islam, B.K. Paul, A. Kawsar, S. Asaduzzaman

- // Optik. — 2018. — Vol. 157. — P. 1357-1365.
28. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier / J. Limpert, A. Liem, M. Reich [et.al.] // Journal of the Optical Society of America. — 2004. — Vol. 12, № 7. — P. 1313-1319.
  29. Holey optical fibers: an efficient modal model / T. M. Monro, D. J. Richardson, N. G. R. Broderick, P. J. Bennett // J. Lightwave Technology. — 2000. — № 17. — P. 1093-1102.
  30. Photonic band gap guidance in optical fibers / J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, P. St. Russell // Science. — 1998. — № 282. — P. 1476-1478.
  31. Birks, T. A. Endlessly single-mode photonic crystal fiber / T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell // Opt. Lett. — 1997. — № 22. — P. 961-963.
  32. Snyder, A. W. Optical Waveguide Theory / A. W. Snyder, J. D. Love. — London : Chapman & Hall, 1995. — 737 p.
  33. Marcuse, D. Theory of Dielectric Optical Waveguides / D. Marcuse. — San Diego : Academic, 1991. — 264 p.
  34. Midrio, M. The space filling mode of holey fibres: an analytic vectorial solution / M. Midrio, M. P. Singh, C. G. Someda // J. Lightwave Technol. — 2000. — № 18. — P. 1031-1048.
  35. Multipole method for microstructured optical fibers. II. Implementation and results / B.T. Kuhlmeier, [et.al.] // Journal of the Optical Society of America B. — 2002. — Vol. 19, № 10. — P. 2331-2340.
  36. Saitoh, K. Confinement losses in airguiding photonic bandgap fibers / K. Saitoh, M. Koshiba // IEEE Photon. Technol. Lett. — 2003. — Vol. 15. — P. 236-238.
  37. Жукова, Л. В. Инфракрасные кристаллы. Теория и практика: учебник / Л. В. Жукова, А. С. Корсаков, Д. Д. Салимгареев. — Екатеринбург : УМЦ УПИ, 2015. — 215 с.
  38. Термодинамическое исследование кристаллов системы AgBr – Tl и получение ИК-световодов нанокристаллической структуры на их основе / А. С. Корсаков [и др.] // Цветные металлы. — 2013. — № 4. — С. 62-65.
  39. Structure modeling and growing  $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$ ,  $\text{Ag}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Br}_{1-x}\text{I}_x$ , and  $\text{Ag}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Cl}_y\text{I}_z\text{Br}_{1-y-z}$  crystals for infrared fiber optics / A. Korsakov [et al.] // J. Cryst. Growth. — 2014. — Vol. 385. — P. 94-99.
  40. Волоконные световоды из галогенидов таллия для среднего

- ИК-диапазона / В. Г. Артюшенко [и др.] // Квантовая электроника. — 1981. — Т. 8, № 2. — С. 398-400.
41. Инфракрасные поликристаллические световоды на основе галогенидов серебра / В. Г. Артюшенко [и др.] // Квантовая электроника. — 1985. — Т. 13, № 3. — С. 601-605.
  42. Investigating the properties of infrared ФКСs based on AgCl – AgBr, AgBr – TlI, AgCl – AgBr – AgI(TlI) crystals theoretically and experimentally / A. S. Korsakov, L. V. Zhukova, D. S. Vrublevsky, E. A. Korsakova // Optics and Spectroscopy. — 2014. — Vol. 117, № 5. — P. 960-963.
  43. Richardson, D. J. High power fiber lasers: current status and future perspectives / D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson // J. Opt. Soc. Am. B. — 2010. — Vol. 27, № 11. — P. B63-B92.
  44. Ballato, J. Materials development for next generation optical fiber / J. Ballato, P. Dragic // Materials. — 2014. — Vol. 7. — P. 4411-4430.
  45. Nielsen, M. D. Photonic crystal fiber with an effective area of  $600 \mu\text{m}^2$  and low bending loss / M. D. Nielsen, J. R. Folkenberg, N. A. Mortensen. // Electron. Lett. — 2003. — Vol. 39, № 25. — P. 1802-1803.
  46. Large mode area multi-trench fiber with delocalization of higher order modes / D. Jain [et al.] // J. Selected Topics in Quant. Electronics. — 2014. — Vol. 20, № 5. — P. 0902909.
  47. Silver halide photonic crystal fibers for the middle infrared / E. Rave [et al.] // Appl. Opt. — 2004. — Vol. 43, № 11. — P. 2236-2241.
  48. Artyushenko, V. Mid IR-fiber for process spectroscopy and laser power delivery / V. Artyushenko // Proc. Adv. Photonics. — 2014. — P. JTu3A.10.
  49. Godard, A. Infrared (2–12  $\mu\text{m}$ ) solid-state laser sources: a review / A. Godard // C.R. Physique. — 2007. — Vol. 8. — P. 1100-1128.
  50. Mid-infrared gas filled photonic crystal fiber laser based on population inversion / A. M. Jones [et al.] // Opt. Express. — 2011. — Vol. 19, № 3. — P. 2309-2315.
  51. Review of infrared fiber-based components / R. R. Gattass [et al.] // Appl. Opt. — 2015. — Vol. 54, P. 31. — P. F25-F34.
  52. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding / J. C. Knight [et al.] // Opt. Lett. — 1995. — Vol. 21, № 19. — P. 1547-1549.
  53. Properties of photonic crystal fiber and the effective index model /



- J. C. Knight [et al.] // J. Opt. Soc. Am. A. — 1998. — Vol. 15, № 3. — P. 748-753.
54. Maji, P. S. Circular photonic crystal fibers: numerical analysis of chromatic dispersion and losses / P. S. Maji, P. R. Chaudhuri // ISRN Opt. — 2013. — P. 1-9.
  55. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier / J. Limpert [et al.] // Opt. Exp. — 2004. — Vol. 12, № 7. — P. 1313-1319.
  56. An endlessly single-mode photonic crystal fiber with low chromatic dispersion, and bend and rotational insensitivity / E. K. Akowuah // J. Lightwave Technol. — 2009. — Vol. 27, № 7. — P. 3940-3947.
  57. Birks, T. A. Endlessly single-mode photonic crystal fiber / T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. Russell // Opt. Lett. — 1997. — Vol. 22, № 13. — P. 961-963.
  58. Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers / N. A. Mortensen [et al.] // Opt. Lett. — 2003. — Vol. 28, № 20. — P. 1879-1881.
  59. Millo, A. Single-mode octagonal photonic crystal fibers for the middle infrared / A. Millo, L. Lobachinsky, A. Katzir // Applied Physics Letters. — 2008. — V. 92. — P. 021112-1-021112-3.
  60. Dong, L. Leakage channel optical fibers with large effective area / L. Dong, X. Peng, J. Li // J. OSA B. — 2007. — Vol. 24, № 8. — P. 1689-1697.
  61. Sarma, T. V. S. An active core fiber optic sensor for detecting trace H<sub>2</sub>S at high temperature using a cadmium oxide doped porous silica optical fiber as a transducer / T. V. S. Sarma, S. Tao // Sensors and Actuators B. — 2007. — Vol. 127. — P. 471-479.
  62. Microstructured active phosphate glass fibers for fiber lasers / A. Schülzgen [et al.] // J. Lightwave Technol. — 2009. — Vol. 27, № 11. — P. 1734-1740.
  63. Koshiba, M. Applicability of classical optical fiber theories to holey fibers / M. Koshiba, K. Saitoh // Opt. Lett. — 2004. — Vol. 29, № 15. — P. 1739-1741.
  64. Chiang, J.-S. Analysis of propagation characteristics for an octagonal photonic crystal fiber (O-ΦKC) / J.-S. Chiang, T.-L. Wu // Opt. Commun. — 2005. — Vol. 258. — P. 170-175.
  65. Korsakov, A. S. Measuring spectral transmission and refractive index of AgCl<sub>1-x</sub>Br<sub>x</sub> ( $0 \leq x \leq 1$ ) and Ag<sub>1-x</sub>Tl<sub>x</sub>Br<sub>1-x</sub>I<sub>x</sub> ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) at the

- wavelength of 10.6  $\mu\text{m}$  / A. S. Korsakov, D. S. Vrublevsky, L. V. Zhukova // Opt. Mat. — 2015. — Vol. 50. — P. 204-207.
66. Vidne, Y. Spatial modes in a  $\Phi\text{KC}$  fiber generated continuum / Y. Vidne, M. Rosenbluh // Opt. Exp. — 2005. — Vol. 13, № 24. — P. 9721-9728.
67. Renversez, G. Second mode transition in microstructured optical fibers: determination of the critical geometrical parameter and study of the matrix refractive index and effects of cladding size / G. Renversez, F. Bordas, B.T. Kuhlmeier // Opt. Lett. — 2005. — Vol. 30, № 11. — P. 1264-1265.
68. Nielsen, M. D. Photonic crystal fiber design based on the V-parameter / M. D. Nielsen, N. A. Mortensen // Opt. Exp. — 2003. — Vol. 11, № 21. — P. 2762-2768.
69. Kogelnik, H. Laser beams and resonators / H. Kogelnik, T. Li // Appl. Opt. — 1965. — Vol. 5, № 10. — P. 1550-1567.
70. Photonic crystal fibers: a new class of optical waveguide / D. Broeng // Opt. Fiber Technol. — 1999. — Vol. 5. — P. 305-330.
71. Investigation of the single-mode operating regime of microstructured radiation-leakage channels / V. V. Demidov [et al.] // J. Opt. Technol. — 2013. — Vol. 80, № 5. — P. 309-312.
72. Gloge, D. Weakly guiding fibers / D. Gloge // Appl. Opt. — 1971. — Vol. 10, № 10. — P. 2252-2258.
73. Paschotta, R. LP modes / R. Paschotta // Encyclopedia of Laser Physics and Technology. — 2008. — P. 856.
74. Analysis of the fundamental space-filling mode of photonic crystal fibres: a symmetry point of view / Y. Li [et al.] // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. — 2008. — Vol. 10. — P. 075302.
75. Mortensen, N. A. Effective area of photonic crystal fibers / N. A. Mortensen // Opt. Express. — 2002. — Vol. 10. — P. 341-348.
76. Knight, J. What can be done with photonic crystal fibers? / J. Knight // Proc. Quantum Electronics and Laser Science Conference. — 2001. — P. QMH1.
77. Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers / M. D. Nielsen [et al.] // Opt. Exp. — 2004. — Vol. 12, № 8. — P. 1775-1779.

# ПРИНЦИП МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОВОДА

## 2.1. Уравнения Максвелла

Уравнения Максвелла – это система уравнений в дифференциальной или интегральной форме, описывающих электромагнитное поле и его связь с электрическими зарядами и токами в вакууме и сплошных средах. Вместе с выражением для силы Лоренца, задающим меру воздействия электромагнитного поля на заряженные частицы, уравнения Максвелла образуют полную систему уравнений классической электродинамики. Установлению уравнений Максвелла предшествовал ряд открытий законов взаимодействий заряженных, намагниченных и токонесущих тел, таких как закон Кулона, Био-Савара, Ампера.

В 1831 г. М. Фарадей открыл закон электромагнитной индукции и примерно в то же время ввёл понятие электрического и магнитного полей как самостоятельных физических типов материи. Опираясь на фарадеевское представление о поле и введя ток смещения, равнозначный по своему магнитному действию обычному электрическому току, Джеймс Клерк Максвелл сформулировал систему уравнений, названную впоследствии уравнениями Максвелла.

Уравнения Максвелла функционально связывают электрическое и магнитное поля с зарядами и токами в дифференциальной или интегральной форме и охватывают собой все известные закономерности макроэлектромагнетизма. Данные уравнения сыграли ключевую роль в развитии представлений теоретической физики и оказали сильное влияние не только на все области физики, непосредственно связанные с электромагнетизмом, но и на многие возникшие впоследствии фундаментальные теории.

### 2.1.1. Интегральная форма уравнений Максвелла

Уравнения Максвелла в интегральной форме называют полевыми, так как при их решении используется математическая теория поля. Существует четыре закона Максвелла, из которых следует, что переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое, а переменное электрическое поле порождает магнитное, т. е. переменные

электрическое и магнитное поля неразрывно связаны друг с другом и являются просто проявлениями единого электромагнитного поля.

Интегральная форма уравнений Максвелла имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} &= \frac{4\pi}{c} \int_S \mathbf{j} dS + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{D} dS, \\ \oint \mathbf{E} d\mathbf{l} &= - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} dS, \\ \oint \mathbf{B} dS &= 0, \\ \oint \mathbf{D} dS &= 4\pi \int_V \rho dV.\end{aligned}\tag{2.1}$$

Эти уравнения предназначены для изучения топологических свойств электромагнитных полей и также являются удобным аппаратом решения конкретных задач электродинамики в системах с достаточно высокой симметрией или с известными распределениями полей [1].

### ***2.1.2. Дифференциальная форма уравнений Максвелла***

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме можно получить из интегральных уравнений с помощью двух теорем векторного анализа: теоремы Гаусса и теоремы Стокса. Преобразование интегральных выражений по этим теоремам позволяет получить следующие уравнения:

$$\begin{aligned}\text{rot } \mathbf{H} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_{\text{ст}} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\ \text{rot } \mathbf{E} &= - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0, \text{div } \mathbf{D} = 4\pi\rho,\end{aligned}\tag{2.2}$$

где  $\mathbf{H}$  – напряженность магнитного поля (магнитный вектор),  $c$  – скорость света в вакууме,  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{j}_{\text{ст}}$  – плотность тока в среде и сторонняя,  $\mathbf{D}$  – электрическое смещение,  $\mathbf{E}$  – напряженность электрического поля (электрический вектор),  $\mathbf{B}$  – магнитная индукция,  $\rho$  – плотность тока [2].

Приведённые выше уравнения Максвелла не являются материальными уравнениями, так как не включают соотношений, связывающих  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{j}$  и учитывающих индивидуальные свойства среды коэффициентов.

Характеристики поля связываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}D &= \varepsilon E, \\B &= \mu H, \\j &= \sigma E, \\ \operatorname{div} j &= -\frac{\partial \rho}{\partial t}.\end{aligned}\tag{2.3}$$

Среда характеризуется параметрами  $\varepsilon = \varepsilon(E, r, t)$ ,  $\mu = \mu(H, r, t)$ ,  $\rho = \rho(r, t)$ ,  $j = j(E, r, t)$  – диэлектрической и магнитной проницаемостями и плотностями заряда и тока соответственно [3].

Для задач оптики, в которых электрическая и магнитная проницаемости постоянны, волновые уравнения принимают вид :

$$\begin{aligned}\operatorname{rot} H &= j\omega D, \\ \operatorname{rot} E &= -j\omega B, \\ \operatorname{div} D &= 0, \\ \operatorname{div} B &= 0.\end{aligned}\tag{2.4}$$

При моделировании цилиндрических однослойных, двухслойных и ФКС-волокон используется данная форма уравнений Максвелла, приведенная к векторной форме. При введении граничных условий и коэффициентов, учитывающих свойства среды и профиль световода, уравнения Максвелла преобразуются к конечному виду, которые интегрируются в программные пакеты, в том числе – SMTP.

## **2.2. Основы передачи электромагнитного излучения**

### ***2.2.1. Распространение электромагнитных волн в фотонно-кристаллических световодах***

Фотонно-кристаллические световоды (ФКС) представляют собой диэлектрические волокна с двумерным изменением показателя преломления (ПП), которое обеспечивается наличием фотонных запрещенных зон (ФЗЗ) для удержания оптического излучения внутри центральной части (сердцевины). Сердцевина ФКС может быть сплошной или полый, выполненной из оптически более или менее плотного материала, чем основная матрица волокна, как показано на рис. 2.1 [4–23].

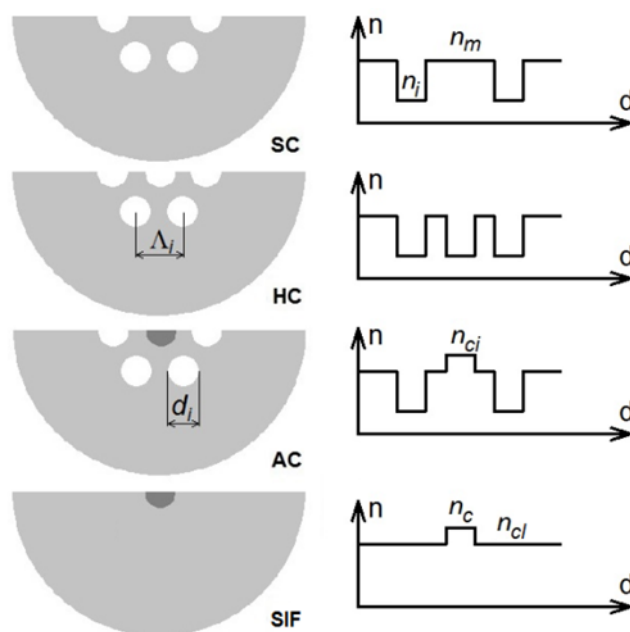


Рис. 2.1. Типы фотонно-кристаллических волокон в сравнении с двухслойным оптическим волокном SIF. SC – ФКС с твердой сердцевиной – silica-core fiber, HC – показатель преломления сердцевины равен индексу кольцевых вставок – hollow-core fiber, AC – показатель преломления сердцевины ФКС превышает индекс матрицы – active core

Отличие ФКС от стандартных волокон, передающих излучение посредством полного внутреннего отражения (ПВО), в принципиально новом механизме распространения световых волн, которые интерферируют при множественном отражении от оболочки, образованной кольцами фотонных запрещенных зон. Такой механизм передачи излучения может быть управляемым, с высокими селективными свойствами, что делает ФКС интересным объектом оптической физики благодаря своим дисперсионным свойствам.

В ФКС, представленных на рис. 2.1 как HC – hollow-core fiber, с сердцевиной из менее плотного материала или воздушными полостями осуществляется каналирование оптического излучения – интерференция волн в среде с фотонными запрещенными зонами и отражение от нее, как показано на рис. 2.2 [3].

В ФКС, представленных на рис. 2.1 как SC – silica-core fiber, с отсутствующим центральным дефектом действует модифицированное полное внутреннее отражение [24]: сердцевина из материала матрицы направляет и удерживает излучение в центре световода, а фотонные запрещенные зоны служат оптическими фильтрами и отражателями, как показано на рис. 2.3. Такие световоды позволяют достигнуть бесконечный одномодовый режим, аномальную дисперсию на коротких

длинах волн, большее двулучепреломление, чем в обычных оптических волокнах.

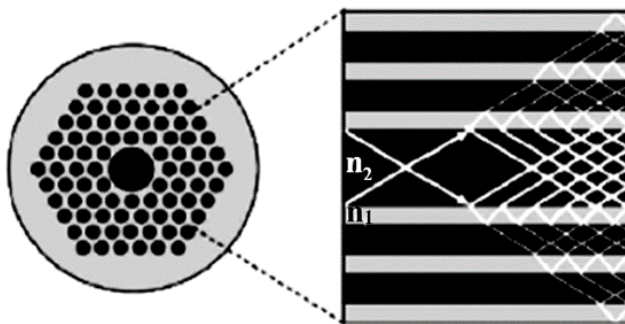


Рис. 2.2. Распространение излучения в ФКС с вставками из оптически менее плотного материала  $n_2 < n_1$

В ФКС, представленных на рис. 2.1 как АС – active-core fiber, с центральной вставкой из оптически более плотного материала осуществляется передача излучения посредством совокупности двух механизмов распространения ЭМ-волн: полного внутреннего отражения, обеспеченного центральным дефектом с большим показателем преломления относительно основной матрицы, и фотонных запрещенных зон с меньшим показателем преломления.

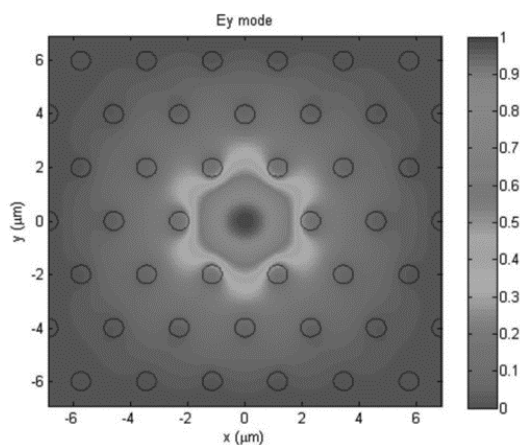


Рис. 2.3. Распределение поля у-поляризованной фундаментальной моды при  $\lambda = 1,5$  мкм, межвставочном расстоянии  $\Lambda = 2,3$  мкм и степени заполнения  $d/\Lambda = 0,3$

В данном случае в оболочке волокна за счет ФЗЗ также происходит интерференция волн оптического диапазона, однако основная часть мощности удерживается в центральной вставке. При малой разнице показателей преломления центрального дефекта, матрицы и кольцевых вставок возможно получение режима, в котором одна часть энергии излучения будет выходить из центра за счет близких значений ПП и интерферировать при отражении от ФЗЗ, вторая часть будет

удерживаться сердцевинной за счет полного внутреннего отражения. Таким образом, по световоду может быть передано излучение высокой мощности с гауссовским распределением пучка и увеличенным до диаметра кольца фотонных вставок полем фундаментальной моды, как показано на рис. 2.4.

Математическое описание распространения излучения в фотонно-кристаллических световодах зависит от действующего механизма передачи, т.е. от выбранной структуры волокна. Для ФКС с наличием одних только ФЗЗ необходимо вводить уравнения и условия, учитывающие интерференцию волн в оболочке волокна. Для ФКС с ФЗЗ и центральным дефектом требуется объединять уравнения интерференции и линейной оптики, а также вводить граничные условия, учитывающие форму вставок и сердцевинны.

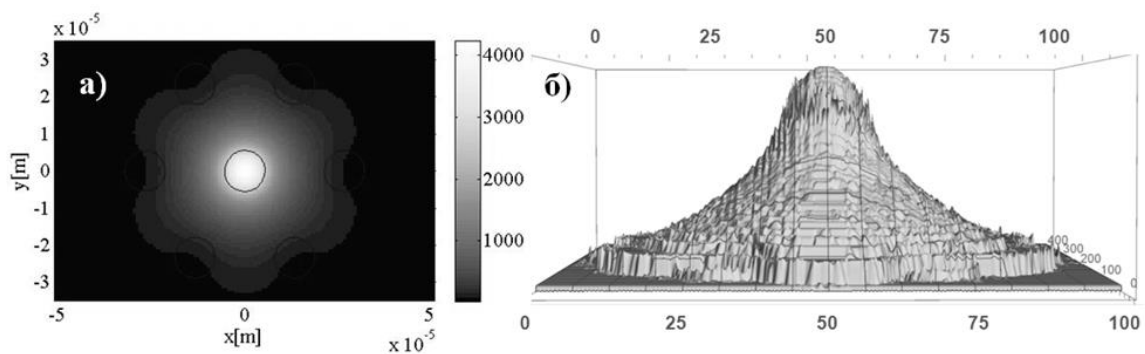


Рис.2.4. Распространение излучения в ФКС с твердотельной сердцевинной с большим показателем преломления, чем в матрице волокна: а) в поперечном сечении, б) в профиле трехмерной модели

Так как само фотонно-кристаллическое волокно и его вставки имеют цилиндрическую форму, необходимо рассмотреть решение уравнений Максвелла для цилиндрического световода со ступенчатым показателем преломления. Данное решение позволит оценить механизм полного внутреннего отражения для ФКС с твердотельной сердцевинной.

Механизм передачи излучения фотонными запрещенными зонами имеет ряд ограничений и условий, таким образом, требует отдельного рассмотрения и решения уравнений Максвелла.

В дальнейшем необходимо рассмотреть единую систему уравнений, решающую задачи распространения ЭМ-волн посредством ПВО и ФЗЗ. Для упрощения вычислений и возможности соотношения результатов с компьютерным моделированием будем решать уравнения Максвелла в векторном виде.



## 2.3. Световод со ступенчатым изменением показателя преломления

### 2.3.1. Уравнение Максвелла для цилиндрического световода

Воспользуемся решениями уравнения Максвелла для случая распространения электромагнитной волны в непроводящем и свободном диэлектрике:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \mathbf{D} &= 0, \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.5)$$

где  $\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}$  и  $\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_r \mu_0$ ;  $\mathbf{E}$  – вектор электрического поля;  $\mathbf{D}$  – вектор электрического смещения;  $\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\mathbf{H}$  – вектор магнитного поля;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость свободного пространства;  $\mu_r$  – магнитная проницаемость среды, которая предполагается равной 1;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость свободного пространства,  $\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость среды, изменяется при разном расстоянии от радиуса.

В зависимости от типа волокна на уравнение будут накладываться ограничения и условия. Так как волокно является двухслойным, радиально-симметричным и ограниченным оболочкой, оно ограничивается радиусом сердцевины  $r$ , а диэлектрическая проницаемость изменяется по закону  $\epsilon_r(r)$ . Профиль изменения показателя преломления в поперечном сечении двухслойного ступенчатого волокна показан на рис. 2.5.

Кроме того, волны в световоде распространяются как в поперечной плоскости, так и вдоль оси волокна, таким образом, излучение всегда имеет осевую составляющую  $E$  или  $H$ . Учитывая радиальную симметрию волокна, запишем решение уравнений в цилиндрических полярных координатах:

$$\begin{aligned} E &= E(r, \varphi) e^{-j(\omega t - \beta z)}, \\ H &= H(r, \varphi) e^{-j(\omega t - \beta z)}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  – угловая частота,  $\nu$  – частота входного излучения,  $\beta$  – постоянная распространения, которая определяется решениями уравнений (2.6) при заданных параметрах среды и излучения [1].

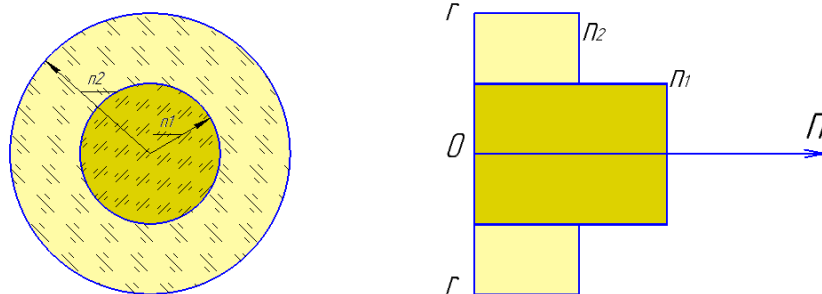


Рис. 2.5. Двухслойное волокно со ступенчатым изменением показателя преломления:  $n_1$  – показатель преломления сердцевины,  $n_2$  – показатель преломления оболочки

Так как уравнения (2.6) имеют одинаковый вид, перепишем их в виде обобщенной функции и будем рассматривать решение на ее примере:

$$\psi = \psi_0(r, \varphi) e^{-j(\omega t - \beta z)}, \quad (2.7)$$

Для получения решения уравнений Максвелла для ступенчатого световода, будем рассматривать волокно, состоящее из однородной сердцевины радиусом  $a$  из материала с показателем преломления  $n_1$  и бесконечно толстой оболочки с показателем преломления  $n_2$  (толщина оболочки много больше диаметра сердцевины) [1].

Так как волокно обладает осевой симметрией, можно в уравнении (2.7) использовать разделение переменных:

$$\psi_0 = \psi_r(r) e^{-jk\varphi}, \quad (2.8)$$

где  $k\varphi$  – фаза излучения,  $k$  – целое число.

Полученное уравнение подставим в (2.6):

$$\psi = \psi_r(r) e^{-jk\varphi} e^{-j\omega t + j\beta z}. \quad (2.9)$$

При использовании цилиндрических координат уравнение преобразуется к виду

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0. \quad (2.10)$$

При подстановке в (2.10) выражения (2.9) получим:

$$\frac{\partial^2 \psi_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_r}{\partial r} + \left( \frac{n^2 \omega^2}{c^2} - \beta^2 - \frac{k^2}{r^2} \right) \psi_r = 0. \quad (2.11)$$

Уравнение (2.11) определяет радиальные картины полей цилиндрического волновода, которые удовлетворяют волновому уравнению. Полученное уравнение может быть переписано следующим образом:

- для сердцевины

$$\frac{\partial^2 \psi_r}{\partial (ur)^2} (ur)^2 + (ur) \frac{\partial \psi_r}{\partial (ur)} + ((ur)^2 - k^2) \psi_r = 0, \quad (2.12)$$

где  $u^2 = \frac{n_1^2}{c^2} \omega^2 - \beta^2$ ;

- для оболочки

$$\frac{\partial^2 \psi_r}{\partial (\omega r)^2} (\omega r)^2 + (\omega r) \frac{\partial \psi_r}{\partial (\omega r)} + (k^2 - (\omega r)^2) \psi_r = 0, \quad (2.13)$$

где  $\omega^2 = \frac{n_2^2}{c^2} \omega^2 - \beta^2$ .

Совместным решением уравнений (2.12) и (2.13) с учетом граничных условий, свойств среды и проходящего излучения, а также определенных дискретных значений для различных модовых порядков, которые определяются принятым коэффициентом  $k$ , может быть получена функция передачи энергии ЭМ-излучения внутри волокна с учетом изменения показателя преломления и материальной дисперсии. Однако при решении уравнений с целью получения корректных результатов необходимо вводить уравнения Бесселя в сердцевине и Ганкеля в оболочке для каждого типа мод, определять дополнительные граничные условия (например по частоте отсечки) и учитывать угол ввода излучения в волокно.

### ***2.3.2. Расчет оптических характеристик световода***

К оптическим характеристикам волокна относится числовая апертура, нормированная частота, потери при изгибе световода. Для световодов со ступенчатым изменением показателя преломления, т.е. двухслойных волокон, принцип действия которых основан на принципах ПВО. приведенные выше параметры выводятся исходя из законов геометрической оптики.

Под числовой апертурой  $NA$  волоконного световода понимается синус угла  $\theta$ , под которым луч света, падающий на его торец, испытывает полное внутреннее отражение на границе раздела

сердцевина – оболочка. Числовая апертура двухслойного волокна с показателями преломления сердцевины  $n_i$  и оболочки  $n_c$ , причем  $n_c < n_i$ , определяется как

$$NA = \sqrt{n_i^2 - n_c^2}. \quad (2.14)$$

По числовой апертуре определяется не только угол входа излучения в волокно, но и угол его выхода. Для одномодовых волокон угол ввода излучения в волокно, как правило, меньше  $10^\circ$ , т.е.  $NA < 0,174$ . Как видно из формулы (2.14), такие значения числовой апертуры достигаются при близких значениях показателей преломления. Для многомодовых световодов угол ввода составляет  $20\text{--}30^\circ$ , соответственно, числовая апертура  $NA > 0,174$ .

Нормированная частота волокна является безразмерным обобщающим параметром световода и связывает его оптические свойства с длиной волны, распространяющейся в волокне:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_i^2 - n_c^2} = \frac{2\pi}{\lambda} NA, \quad (2.15)$$

где  $a$  – радиус сердцевины волокна,  $\lambda$  – длина волны проходящего излучения.

Если нормированная частота  $V < 2,405$ , по волокну распространяется лишь один тип волны, следовательно, режим работы световода является одномодовым. Если  $V > 2,405$ , то волокно является многомодовым. Таким образом,  $V$ -параметр позволяет выбрать волокно с необходимым режимом работы только по оптическим свойствам материалов сердцевины и оболочки и длине волны проходящего излучения.

Потери при изгибе  $\alpha$  двухслойного волокна складываются из двух типов. Первая группа – это потери, обусловленные резким изменением радиуса изгиба  $\alpha_i$ , которое вызывает рассогласование модовых полей. Такие потери называют переходными, они возникают в месте соединения прямого и изогнутого волокна. В изогнутом волокне центр модового поля смещен относительно оси волокна на некую величину  $d$ , зависящую от радиуса изгиба волокна. В результате поля мод прямого и изогнутого волокон в месте их соединения оказываются смещенными друг относительно друга также на величину  $d$ . Поэтому только часть мощности моды прямого волокна передается моде изогнутого волокна, а остальная мощность преобразуется в оболочечные моды и теряется.

Другой вид потерь  $\alpha_{\text{пер}}$ , возникает непосредственно на изгибе световода, когда излучение теряется через боковую стенку волокна: на изгибе периферийная часть моды распространяется со скоростью, большей скорости света в среде (в оболочке), в связи с чем начинает выходить в оболочку волокна и затем теряется. Величина этих потерь тем больше, чем больше число витков волокна и чем меньше радиус изгиба. Таким образом, потери в изогнутом волокне возникают из-за двух различных механизмов и рассчитываются как сумма двух составляющих:

$$\alpha = \alpha_{\text{и}} + \alpha_{\text{пер}}. \quad (2.16)$$

Потери первого типа определяются экспериментально. Расчет переходных потерь на макроизгибе радиуса  $R$  можно выполнить по формуле

$$\alpha_{\text{пер}} = 0,271 \frac{V^4 n_2^2}{\left(\frac{R}{a}\right)^2 (n_1 - n_c)^2} \cdot \left(0,65 + \frac{1,62}{\sqrt{V^3}} + \frac{2,88}{V^6}\right)^6 \quad (2.17)$$

где  $a$  – радиус сердцевины ОВ,  $V$  – нормированная частота.

### 2.3.3. Расчет нелинейных характеристик световода

Нелинейные свойства в световодах со ступенчатым показателем преломления проявляются при больших длинах волокна (комбинационное рассеяние, эффект Керра и пр.), однако такие эффекты, как фазовая самомодуляция, самофокусировка пучка, дисперсия мод, могут наблюдаться и при малых длинах световода. Для инфракрасных волокон на основе модифицированных галогенидов серебра и одновалентного таллия характерны нелинейные свойства второй группы, так как их длины не превышают 10 м. В частности, для ИК-световодов со ступенчатым показателем преломления могут быть определены коэффициенты связи мод и потери на вытекание излучения из сердцевины, которые позволяют оценить эффекты кроссинга и перекрестных помех между волокнами, собранными в сборку.

Коэффициент связи мод в ступенчатых световодах рассчитывается по формуле:

$$k'_{\text{pq}} = \frac{\sqrt{\Delta_1}}{a_1} \frac{U_1^2}{V_1^3 K_1^2(W_1)} \sqrt{\frac{\pi a_1}{W_1 \Lambda}} \exp\left(-\frac{W_1}{a_1} \Lambda\right), \quad (2.18)$$

где  $\Delta_1$  – разность показателей преломления  $n_1 - n_0$  сердцевины и оболочки (матрицы),  $a_1$  – радиус сердцевины,  $U_1^2 = a_1^2(k^2 n_1^2 - \beta^2)$ , где  $k$  – волновое число:  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $V^2 = k a_1 n_1 \sqrt{(2\Delta_1)}$ ,  $K_1(W_1)$  – функция Бесселя второго рода первого порядка,  $W_1 = a_1 \sqrt{(\beta^2 - k^2 n_0^2)}$ ,  $\Lambda$  – межвставочное расстояние. Данный коэффициент позволяет оценить потери на вытекание излучения из сердцевины волокна, помехи между отдельными вставками в микроструктурированном волокне, а также помехи между индивидуальными волокнами, собранными в сборку. Помехи между несколькими элементами одной многосердцевинной структуры или между индивидуальными волокнами в сборке оцениваются с помощью параметра ХТ, называемого «перекрестными помехами» и рассчитываемого по формуле:

$$X_{T_{pq}} = \frac{2k_{pq}^2 R_b}{\beta \lambda} L, \quad (2.19)$$

где  $R_b$  – радиус изгиба волокна или сборки,  $L$  – длина волокна или сборки световодов.

## 2.4. Фотонно-кристаллический световод

### 2.4.1. Уравнение Максвелла для фотонно-кристаллического световода с твердой сердцевиной

Математическое моделирование фотонно-кристаллических структур может осуществляться различными методами. Так как компьютерное моделирование осуществляется в программном пакете SMTP, интегрированном в Matlab и основанном на мультипольном подходе, для математического решения уравнений Максвелла также воспользуемся данным подходом.

Рассмотрим структуру с гексагональным расположением фотонных вставок в диэлектрическом световоде радиуса  $R_0$  и бесконечной протяженностью вдоль оси  $z$ , представленную на рис. 2.6. Пусть показатель преломления матрицы составит  $n_e$ , вставок  $n_i$ , количество фотонных включений  $N$  с диаметром каждого  $d$ , межвставочное расстояние составляет  $\Lambda$ . Для всех вставок выполняется условие  $n_e > n_i$ . Показатель преломления окружающей среды или наружной оболочки ФКС составляет  $n_0$ .



Фурье-Бесселя:  $J_m$  и  $H_m$  функции Бесселя и Ганкеля первого рода, зависящие от координаты  $z$ , порядка  $m$ :

$$E_z = \sum_m A_m^{El} J_m(k_{\perp}^e r_l) + B_m^{El} H_m^{(1)}(k_{\perp}^e r_l) \exp(im(\theta)). \quad (2.24)$$

Аналогичная функция определяется для магнитного поля с коэффициентами  $A_m^{Kl}$  и  $B_m^{Kl}$ . В уравнении (2.24)  $J_m$  – вещественная часть  $A_m^{El}$  и  $B_m^{El}$ , представляющая непрерывно проходящую электромагнитную волну первой вставки, может быть как отраженной от соседних вставок, так и приходящей от источника излучения. Таким образом, (2.24) справедливо только в кольцевом пространстве фотонных вставок и не описывает разложение поля в остальной плоскости ФКС. С этой целью вводится дополнительное описание полей, основанное на суперпозиции исходных и сгенерированных волн [4, 25].

Электромагнитные поля внутри ФКС могут быть записаны как суперпозиция исходящих волн от всех вставок, находящихся в структуре волокна. Если волны возникают вне вставок (в том числе в матрице), их разложение выражается через волны J-типа (2.25). Каждый член из  $m$ -множества первого слагаемого уравнения представляет собой исходящее волновое поле с источником в  $N$  цилиндре, из второго слагаемого – регулярное поле, возникающее на границе оболочки.

$$E_z = \sum_{i=1}^N \sum_m B_m^{El} H_m^{(1)}(k_{\perp}^e |r_j|) \exp[im \arg(r_j - c_l)] + \sum_m A_m^{E0} J_m(k_{\perp}^e r_l) \exp(im\theta) \quad (2.25)$$

Согласованность рассчитанных по уравнениям (2.24) и (2.25) ЭМ-полей достигается при их приравнении (2.26), что возможно благодаря наличию общих условий среды, источников излучения и, следовательно, наличию общих членов обоих разложений  $H_m^{(1)}(k_{\perp}^e r_l)$  [26].

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \sum_m B_m^{El} H_m^{(1)}(k_{\perp}^e |r_l|) \exp[im \arg(r - c_l)] + \\ & + \sum_m A_m^{E0} J_m(k_{\perp}^e r_l) \exp(im\theta) = \\ & = \sum_m A_m^{El} J_m(k_{\perp}^e r_l) + B_m^{El} H_m^{(1)}(k_{\perp}^e r_l) \exp(im\theta). \end{aligned} \quad (2.26)$$

При наличии конкретного количества источников излучения, малого числа вставок и наличии строго связанных мод, при которых отсутствуют потери на удержание моды, уравнение (2.22) может быть приведено к нетривиальному решению задачи рассеяния с нулевым возбуждением.



Под нулевым возбуждением понимается набор фиктивных источников излучения, помещенных в структуру ФКС: один комплект помещается в матрицу, генерируемое им излучение используется для приближения поля внутри цилиндра; другой набор помещается внутрь вставок, генерируемое им излучение используется для приближения поля вне цилиндра. Элементарные источники, составляющие каждый набор, помещаются в однородную среду с соответствующими параметрами и излучают с одинаковыми частотами. Затем комплексные амплитуды источников корректируются для условий непрерывности в наборе контрольных точек на поверхности цилиндра. Таким образом, выражения поля автоматически удовлетворяют уравнениям Максвелла, точность решения возрастает с количеством источников и точек тестирования.

Поля элементарных источников получены из векторных потенциалов. Магнитный векторный потенциал  $A$ , который является ротором магнитной индукции поля, связан с протекающим электрическим током  $I$  на расстоянии  $r$  от него и определяется выражением

$$A = \frac{I}{4j} H_0^{(2)}(k_{\perp} r) u_z, \quad (2.27)$$

где  $H_0^{(2)}$  – функция Ганкеля второго рода нулевого порядка,  $u_z$  – единичный  $z$ -вектор,  $k_{\perp}$  – радиальное волновое число, зависящее от параметров среды, которое может быть найдено как

$$k^2 = k_{\perp}^2 + \beta^2. \quad (2.28)$$

ЭМ-поле возникает при взаимодействии электрических  $I$  и магнитных  $K$  элементарных токов, что математически может быть описано системой уравнений, зависящих от  $I$  и  $K$  соответственно. Так, в общем случае ЭМ-поле получается из магнитного векторного потенциала  $A$  и может быть представлено через векторы магнитной и электрической индукции.

$$H = \nabla \times A, E = -j\omega\mu_0 A + \frac{1}{j\omega\epsilon_0\epsilon_r} \nabla(\nabla \cdot A). \quad (2.29)$$

Для магнитной составляющей поля (ТМ) уравнения (2.29) могут быть расширены до (2.30), (2.31), так как ЭМ-поле зависит от электрического токопроводящего элемента – элементарной токовой нити  $I$ :

$$E^{TM}(I) = \frac{\beta k_{\perp} I}{4j\omega\epsilon_0\epsilon_r} H_1^{(2)}(k_{\perp} r) u_r - \frac{k_{\perp}^2 I}{4\omega\epsilon_0\epsilon_r} H_0^{(2)}(k_{\perp} r) u_z, \quad (2.30)$$

$$H^{TM}(I) = \frac{\beta k_{\perp} I}{4j\omega\epsilon_0\epsilon_r} H_1^{(2)}(k_{\perp} r) u_z, \quad (2.31)$$

где  $H_1^{(2)}$  – функция Ганкеля второго рода первого порядка. Аналогично для электрической составляющей поля (TE) уравнения зависят от промасштабированного магнитного поля  $K$  и принимают вид:

$$E^{TE}(K) = \frac{jk_{\perp} K}{4} H_1^{(2)}(k_{\perp} r) u_z, \quad (2.32)$$

$$H^{TE}(K) = \frac{\beta k_{\perp} K}{4j\omega\mu_0} H_1^{(2)}(k_{\perp} r) u_r - \frac{k_{\perp}^2 K}{4\omega\mu_0} H_0^{(2)}. \quad (2.33)$$

Для получения моделей используется линейная комбинация элементарных полей, количество которых определяется числом токовых нитей, которые имеют  $z$ -направленность и бесконечны на всей своей протяженности.  $N_i$  таких нитей задается в расчете в качестве источников излучения, равномерно располагающихся вдоль кривой вставок (пунктирные линии вокруг включений на рис. 2.6) в оптически более плотной среде, чем фотонные включения. Поля от  $N_c$  фиктивных источников взаимодействуют, и их комплексные амплитуды фиксируются в тестовых точках, расположенных внутри включений, причем  $N_c \geq N_i$ . По значениям, полученным в тестовых точках, осуществляется аппроксимация полей по всему сечению световода.

Для корректности решения необходимо выполнение двух условий непрерывности полей: тангенциальной – через границы включений и осевой – вдоль направления оси  $z$ . При невыполнении условий непрерывности заключаются выводы об отсутствии мод в исследуемом ФКС.

Результатом всех приближенных расчетов по уравнениям (2.30) – (2.33) является (2.34), где импедансная матрица  $[Z]$  должна быть сингулярной с ненулевым детерминантом.

$$[Z]\vec{I} = \vec{0}. \quad (2.34)$$

При решении (2.34) выполняется поиск значений  $\beta$  для каждого  $u$  до нахождения пар, которые соответствуют управляемым модам. При нахождении пары  $u - \beta$  программно осуществляется разложение линейных комбинаций по тестовым точкам и графическое отображение картин мнимого или действительного электрического или магнитного полей, а также комплексного поля по вектору Пойнтинга (суперпозиция составляющих поля), как показано на рис. 2.7.

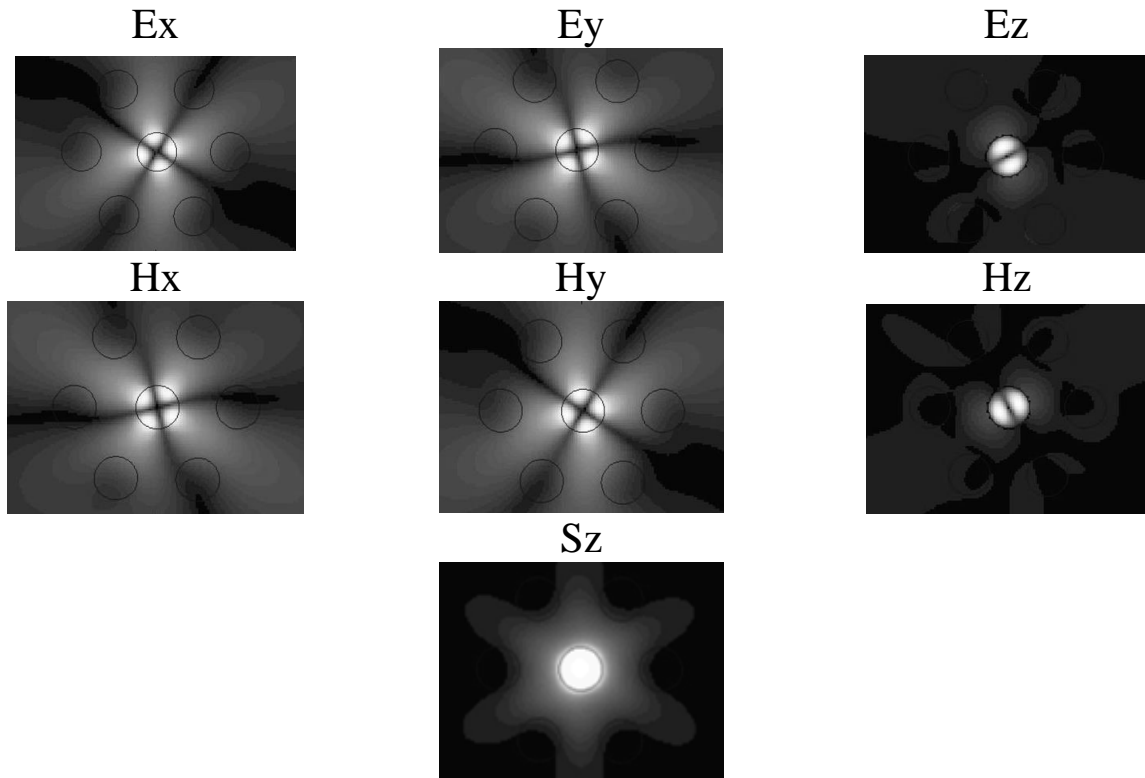


Рис. 2.7. Разложение ЭМ-поля по координатным векторам Охуz и суперпозиция данных полей (вектор Пойнтинга  $S_z$ )

#### 2.4.2. Расчет оптических характеристик ФКС

Оптическими характеристиками ФКС также являются нормированная частота, числовая апертура и потери при изгибе. Нормированная частота  $V$  была рассмотрена ранее (глава 1, раздел 1.3.6) и определяется по эффективным показателям преломления проходящих мод. Числовая апертура для ФКС также определяет угол ввода излучения и выводится из закона Снелля (Снеллиуса).

Согласно известному закону Снелля, на границе воздух – сердцевина, угол падения луча  $\theta_a$  в воздухе соответствует углу падения луча  $\theta_c$  в сердцевине через отношение  $1 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_c$ , из которого следует:

$$\sin \theta_a = n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_c} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2.35)$$

Синус угла падения луча из менее оптически плотной среды в более оптически плотную равняется числовой апертуре волокна NA:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (2.36)$$

Величина  $\Delta$ , называемая относительной разностью показателей преломления, определяется как

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}. \quad (2.37)$$

Угол  $\theta_a = \arcsin(\text{NA})$  еще называется углом приема волокна. Данный угол определяет конус внешних лучей, которые распространяются волокном. Лучи, падающие при углах больших, чем  $\theta_a$ , преломляются в волокно, но распространяются только на небольшое расстояние. Числовая апертура, следовательно, является светособирающим свойством волокна. Когда распространяющиеся лучи достигают конца волокна, на выходе они преломляются в конус с углом при вершине  $\theta_a$ . Таким образом, угол приема излучения волокном является важным параметром для разработки систем собирания и испускания излучения в волокне. Углы  $\theta_a$  и  $\theta_c$  обычно имеют малые значения.

Потери, возникающие при изгибе фотонно-кристаллического волокна определяются как

$$\alpha(R) = \frac{8.686}{8\sqrt{6}\pi} \frac{1}{n_c} \frac{\Lambda}{A_{\text{eff}}} \frac{\lambda}{\Lambda} F \left[ \frac{R\lambda^2}{6\pi^2 n_c^2 \Lambda^3} V^3 \right], \quad (2.38)$$

где  $A_{\text{eff}}$  – эффективная площадь поля моды,  $F(z) = z^{-0.5} \exp(-z)$ ,  $V$  – волноводный параметр.

### 2.4.3. Расчет нелинейных характеристик ФКС

Фотонно-кристаллические световоды применяются для решения задач нелинейной оптики в качестве каналов доставки импульсного и непрерывного лазерного излучения высокой мощности, а также фильтров пространственных частот. Для ФКС характерными являются следующие нелинейные свойства: самомодуляция фаз, самофокусировка и саморасфокусировка пучка, потери в конфайнменте (поперечном сечении волокна). Приведенные эффекты могут оказывать как негативное воздействие на оптические свойства волокна, например высокие потери излучения в поперечном сечении, увеличение порядка моды, так и положительные – самофокусировка пучка, увеличенная площадь фундаментальной моды, одномодовый режим работы, пропускание энергии высокой мощности.

Для фотонно-кристаллических световодов могут быть определены потери на вытекание излучения в структуру световода (потери в конфайнменте), коэффициент связи мод, потери на изгиб для первой моды. Последний параметр требует дополнительного вычисления площади фундаментальной моды  $A_{\text{eff}}$ .

Потери на вытекание излучения в структуру волокна можно назвать потерями в матрице ФКС, так как именно матрица является поглощающим слоем [12, 25], и рассчитать по формуле

$$\alpha = \frac{20 \cdot 10^{-6} 2\pi}{\ln 10 \cdot \lambda} \operatorname{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (2.39)$$

где  $n_{\text{eff}}$  – эффективный показатель преломления на длине волны  $\lambda$ .

Коэффициент связи мод в фотонно-кристаллических световодах определяется при многомодовом режиме работы волокна, а также для сборок из нескольких ФКС. Расчет данного параметра осуществляется в два этапа: во-первых, определяются коэффициенты из уравнения (2.14), вытекающие из центральной вставки в матрицу, как для двухслойного ступенчатого волокна; далее определяется коэффициент связи мод между матрицей и фотонными запрещенными зонами [26]:

$$k''_{pq} = \frac{\sqrt{\Gamma} \sqrt{\Delta_1}}{a_1} \frac{U_1^2}{V_1^3 K_1^2(W_1)} \sqrt{\frac{\pi a_1}{W_1 \Lambda}} \exp \left[ -\frac{W_1 \Lambda + 2(W_2 - W_1) d_i}{a_1} \right], \quad (2.40)$$

где  $\Gamma = \frac{W_1}{W_1 + (W_2 - W_1) \frac{w_{\text{tr}}}{\Lambda}}$ ,  $W_2 = \sqrt{V_2^2 - W_1^2}$ ,  $V_2 = ka_1 \sqrt{(n_m^2 - n_i^2)}$ ,

$d_i$  – ширина фотонной запрещенной зоны (диаметр вставок Ф33). В случае ФКС в качестве  $a_1$  – межвставочное расстояние  $\Lambda$ , однако для сборки фотонно-кристаллических волокон  $a_1$  – радиус индивидуального ФКС.

## Выводы по главе 2

В данной главе рассмотрены механизмы распространения излучения в двухслойных волокнах со ступенчатым изменением показателя преломления и в фотонно-кристаллических волокнах с фотонными запрещенными зонами. Описаны уравнения Максвелла для диэлектрических волокон. Приведены решения уравнений Максвелла для цилиндрического одно- или двухслойного волокна, а также для ФКС. Показаны результаты решения уравнений Максвелла для ФКС в виде двумерного изображения распространения отдельных и совокупных ЭМ-волн в поперечном сечении волокна (см. рис. 2.7).

Также в главе приведены формулы для расчета оптических линейных и нелинейных свойств двухслойных и фотонно-кристаллических световодов. К оптическим свойствам волокон относится нормированная частота (V-параметр), числовая апертура (NA), угол ввода излучения в световод, относительная разность показателей преломления,

потери при изгибе. V-параметр позволяет оценить режим работы волокна, числовая апертура определяет угол ввода-вывода излучения в световод. Нелинейные свойства, возникающие в двухслойных инфракрасных волокнах, представляют собой перекрестные помехи (ХТ), а также оказывающий на величину ХТ безразмерный параметр  $k''$  – коэффициент связи мод. Для фотонно-кристаллических волокон определяются потери на вытекание излучения в структуру световода, вызывающие самофокусировку пучка и фазовую модуляцию мод, а также коэффициенты связи мод. Формулы для расчета оптических свойств одинаковы как для кварцевых, так и для галогенидсеребряных световодов.

### *Задачи*

1. Даны двухслойное волокно со ступенчатым изменением показателя преломления и ФКС гексагональной структуры. Диаметр сердцевин первого волокна равен диаметру вставок ФКС. По световодам передается излучение длиной волны  $\lambda=10,6$  мкм. Определите числовую апертуру и относительную разность показателей преломления, если для световода первой структуры показатели преломления  $n_1 = n_{\text{clad}}$  – параметры оболочки,  $n_2 = n_{\text{core}}$  – сердцевин; для второй структуры –  $n_1 = n_m$  – параметры матрицы,  $n_2 = n_{\text{ci}}$  – центральной вставки. Значения показателей преломления указаны в таблице.

Данные для задачи 1

№ варианта	$n_{\text{core}}$	$n_{\text{clad}}$	$n_m$	$n_{\text{ci}}$
1	2,164	2,161	2,140	2,128
2	2,153	2,149	2,239	2,223
3	2,163	2,162	2,162	2,161
4	2,209	2,172	2,172	2,164
5	2,175	2,172	2,209	2,202
6	2,140	2,128	2,164	2,161
7	2,239	2,223	2,153	2,149
8	2,162	2,161	2,163	2,162
9	2,172	2,164	2,209	2,172
10	2,209	2,202	2,175	2,172

2. По полученным в задаче 1 значениям нормированной частоты определите режим работы двухслойного световода. Вычислите, при каком минимальном значении показателя преломления оболочки возможен одномодовый режим работы световода с сердцевинной, соответствующей вашему варианту.

### *Библиографический список*

1. Гауэр, Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауэр. — Москва : Радио и связь, 1989. — 507 с.
2. Сойфер, В. А. Дифракционная нанофотоника / В. А. Сойфер. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 680 с.
3. Шумкова, Д. Б. Специальные волоконные световоды / Д. Б. Шумкова, А. Е. Левченко. — Пермь : ПНИПУ, 2011. — 178 с.
4. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation / T. P. White [et al.] // J. Opt. Soc. Am. B. — 2002. — Vol. 19. — P. 2322-2330.
5. Broeng, D. Photonic crystal fibers: a new class of optical waveguide / D. Broeng // Opt. Fiber Technol. — 1999. — Vol. 5. — P. 305-330.
6. Richardson, D. J. High power fiber lasers: current status and future perspectives / D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson // J. Opt. Soc. Am. B. — 2010. — Vol. 27, № 11. — P. B63-B92.
7. Ballato, J. Materials development for next generation optical fiber / J. Ballato, P. Dragic // Materials. — 2014. — Vol. 7. — P. 4411-4430.
8. Nielsen, M. D. Photonic crystal fiber with an effective area of  $600 \mu\text{m}^2$  and low bending loss / M. D. Nielsen, J. R. Folkenberg, N. A. Mortensen. // Electron. Lett. — 2003. — Vol. 39, № 25. — P. 1802-1803.
9. Large mode area multi-trench fiber with delocalization of higher order modes / D. Jain [et al.] // J. Selected Topics in Quant. Electronics. — 2014. — Vol. 20, № 5. — P. 0902909.
10. Silver halide photonic crystal fibers for the middle infrared / E. Rave [et al.] // Appl. Opt. — 2004. — Vol. 43, № 11. — P. 2236-2241.
11. Mogilevtsev, D. Group velocity dispersion in photonic crystal fibers / D. Mogilevtsev, T. A. Birks, P. St. J Russell // Opt. Lett. — 1998. — № 23. — P. 1662-1664.
12. Yamashita, E. Modal analysis method for optical fibers with symmetrically distributed multiple cores / E. Yamashita, S. Ozeki, K. Atsuki // J. Lightwave Technolgy — 1985. — № 3. — P. 341-346.
13. Analysis methods for electromagnetic wave problems / edit. by E. Yamashita. — London : Artech House, 1990. — 414 p.
14. Structure design of submarine optical fiber cable / T. Yabuta, K. Yamashita, O. Kawata [et.al.] // OSA Technical Digest. — 1981. —

P. MD2.

15. McIsaac, P. R. Symmetry-induced modal characteristics of uniform waveguides – I: Summary of results / P. R. McIsaac // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. — 1975. — Vol. 23. — P. 421-429.
16. Hochman, A. Analysis of strictly bound modes in photonic crystal fibers by use of a source-model technique / A. Hochman, Y. Leviatan // Journal of the Optical Society of America A. — 2004. — Vol. 21, № 6. — P. 1073-1081.
17. Hochman, A. Calculation of confinement losses in photonic crystal fibers by use of a source-model technique / A. Hochman, Y. Leviatan // Journal of the Optical Society of America B. — 2005. — Vol. 22, № 2. — P. 474-480.
18. Hochman, A. Modal dynamics in hollow-core photonic-crystal fibers with elliptical veins / A. Hochman, Y. Leviatan // Optics Express. — 2005. — Vol. 13, № 16. — P. 6193-6201.
19. Hochman, A. Determination of a dielectric waveguide propagation constant using a multifilament-current model / Optics Letters. — 1989. — Vol. 14, № 18 — P. 1026-1028.
20. Altman, Z. Cutoff frequencies of dielectric waveguides using the multifilament current model / Z. Altman, H. Cory, Y. Leviatan // Microwave Opt. Technol. Lett. — 1990. — Vol. 3. — P. 294-295.
21. Comparison of different methods for rigorous modeling of photonic crystal fibers / M. Szpulak, W. Urbanczyk, A. Hochman [et. al.] // Opt. Express. — 2006. — Vol. 14. — P. 5699-5714.
22. Knight, J. C. Photonic band gap guidance in optical fibers / J. C. Knight [et.al.] // Science. — 1998. — № 282. — P. 1476-1478.
23. Investigating the properties of infrared ФКС based on AgCl – AgBr, AgBr – TlI, AgCl – AgBr – AgI(TlI) crystals theoretically and experimentally / A. S. Korsakov, L. V. Zhukova, D. S. Vrublevsky, E. A. Korsakova // Optics and Spectroscopy. — 2014. — Vol. 117, № 6. — P. 960-963.
24. Improved fully vectorial effective index method for photonic crystal fibers: evaluation and enhancement / Y. Li, Y. Yao, M. Hu [et.al.] // Applied Optics. — 2008. — Vol. 47, № 3. — P. 399-406.
25. Одномодовый микроструктурированный световод для среднего ИК диапазона с большой площадью поля моды / Л. Н. Бутвина [и др.] // Квантовая электроника. — 2009. — Т. 39, № 3. — С. 283-286.
26. A new and simple method for crosstalk estimation in homogeneous trench-assisted multi-core fibers / Y. Feihong [et al.] // ACP 2014, OSA 2014. — 2014. — P. AW4C.3.



### МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВЕТОВОДА

Фотонно-кристаллические световоды востребованы в мире волоконной оптики благодаря своим уникальным свойствам: широкому диапазону прозрачности, высокой селективности и механической прочности. Для практического применения важной особенностью ФКС также является возможность передачи излучения в одномодовом режиме с большим диаметром поля моды и гауссовским распределением пучка в поперечном сечении, что достигается за счет наличия фотонных запрещенных зон. Для получения световодов с данными параметрами передачи необходимо провести исследование факторов, влияющих на режим пропускания ЭМ-волн: разности показателей преломления, размера вставок, межвставочного расстояния и количества колец включений.

#### **3.1. Исследование модовой дисперсии световода в зависимости от разности квадратов показателей преломления**

##### ***3.1.1. Основные параметры симуляции ФКС***

Фотонно-кристаллический световод с твердотельной центральной вставкой  $n_c$  и большим показателем преломления, чем в основной матрице  $n_c > n_m$ , совмещает в себе два механизма передачи излучения: полное внутреннее отражение и фотонные запрещенные зоны [1]. Вклад каждого из этих механизмов определяется рядом параметров: длиной волны излучения, формой и размерами включений, разностью показателей преломления. Последний из параметров для ФКС с оптически более плотной центральной вставкой оказывает наибольшее воздействие на модовую дисперсию, порядок проходящих мод и потери в конфайнменте, в связи с чем исследование зависимости режима работы световода от разности показателей преломления необходимо проводить в первую очередь.

Для исследования зависимости модовой дисперсии от состава волокна необходимо задать конфигурацию структуры световода, размеры волокна и вставок, показатели преломления на длине волны проходящего излучения, диэлектрические проницаемости оптической

среды. В качестве примера исследования был выбран фотонно-кристаллический световод с гексагональным расположением вставок: диаметр сердцевины  $D = 100$  мкм, диаметр включений  $d_i = d_c = 30$  мкм, межвставочное расстояние  $\Lambda = 60$  мкм, длина волны проходящего излучения  $\lambda = 10,6$  мкм. Показатели преломления матрицы  $n_m$ , гексагонального кольца вставок  $n_i$  и центральной вставки  $n_c$  определялись составом световодов, которые приведены в табл. 3.1. При выборе составов матрицы и включений ФКС необходимо выполнение условия  $n_i < n_m < n_{ci}$ .

Таблица 3.1

Исследуемые составы фотонно-кристаллических световодов и их показатели преломления. На пересечении строки и столбца таблицы указан состав матрицы  $n_m$

Состав периферийных вставок в мол. % AgBr в AgCl; $n_i$	Состав центральной вставки в мол. % ТП в AgBr; $n_c$				
	0,5 2,165	0,9 2,168	1,1 2,170	2,0 2,180	3,0 2,190
75,0 2,123	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157
	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159
82,0 2,129	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157
	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159
84,0 2,134	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157
	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159
87,0 2,154	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157
	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159
93,0 2,156	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157	95,0 2,157
	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159	98,0 2,159

В табл. 3.1 каждой паре «кольцевая вставка – центральное включение» ( $n_i - n_{ci}$ ) соответствует два состава материала матрицы: 95 мол.% AgBr в AgCl при  $n_m = 2,157$  и 98 мол.% AgBr в AgCl

при  $n_m = 2,159$ . Таким образом, исследовалось 50 составов фотонно-кристаллических световодов.

### ***3.1.2. Исследование модового режима ФКС в зависимости от разности квадратов показателей преломления***

Для каждого из составов в программе SMTP, интегрированной в Matlab, можно смоделировать ФКС и определить количество мод и их структуру, а также эффективные показатели преломления. Если дополнительно рассчитать разности квадратов показателей преломления матрицы и кольцевых вставок и матрицы и центрального включения, возможна оценка вкладов каждого из механизмов передачи излучения: ФЗЗ и ПВО.

Чтобы оценить зависимость количества мод от разности квадратов показателей преломления, была выполнена компьютерная симуляция ФКС гексагональной структуры на основе представленных в разделе 3.1.1 составов. На основании полученных в результате симуляции и при расчете данных был построен график зависимости количества мод от разности квадратов показателей преломления с выделением (зеленые маркеры) одномодовых режимов с модой низшего порядка, как показано на рис. 3.1.

По графику на рис. 3.1 можно сделать вывод о пропуске фундаментальной моды при разностях менее  $\Delta n = 0,04$ , что возможно при близких численных значениях показателей преломления матрицы и вставок. Таким образом, для получения фотонно-кристаллического световода с увеличенным полем моды необходимо обеспечить малые разности квадратов показателей преломления, а значит, близкие составы матрицы, кольцевых вставок и центрального дефекта. Кроме того, можно заметить, что малая разница показателей преломления не гарантирует наличия увеличенного диаметра поля моды, что очевидно по рис. 3.1: при  $\Delta n < 0,04$  присутствуют моды высшего порядка, и что подтверждается полученными в результате симуляции моделями, представленными на рис. 3.2.

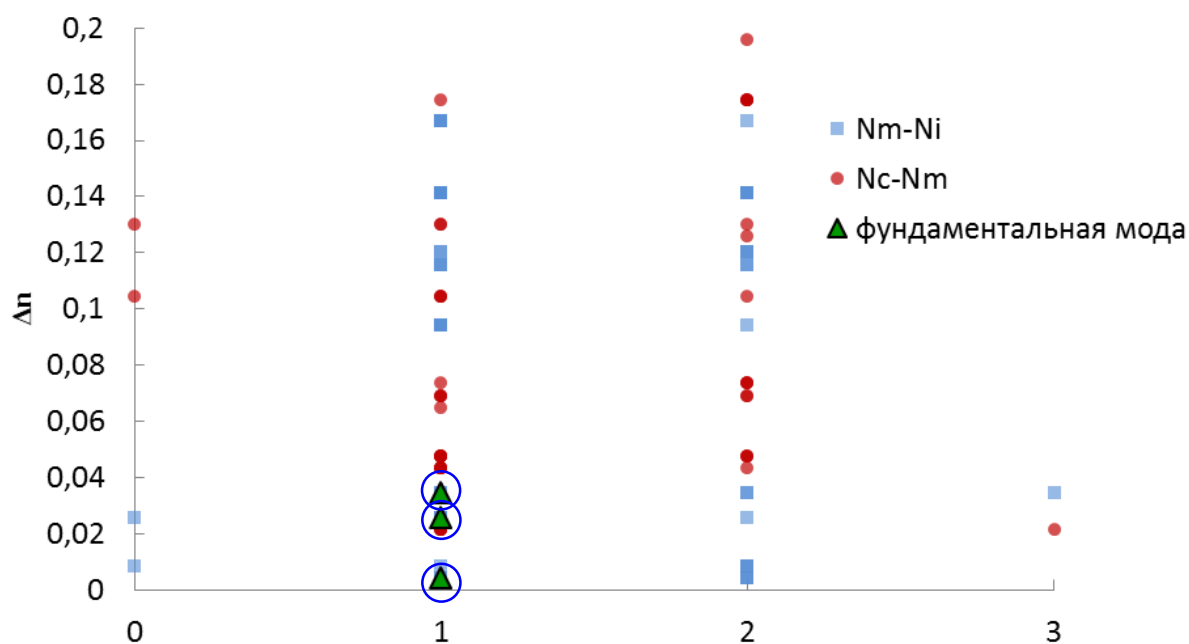


Рис. 3.1. Зависимость количества мод от разности показателей преломления матрицы и кольцевых вставок, матрицы и центрального дефекта, с выделенными фундаментальными модами

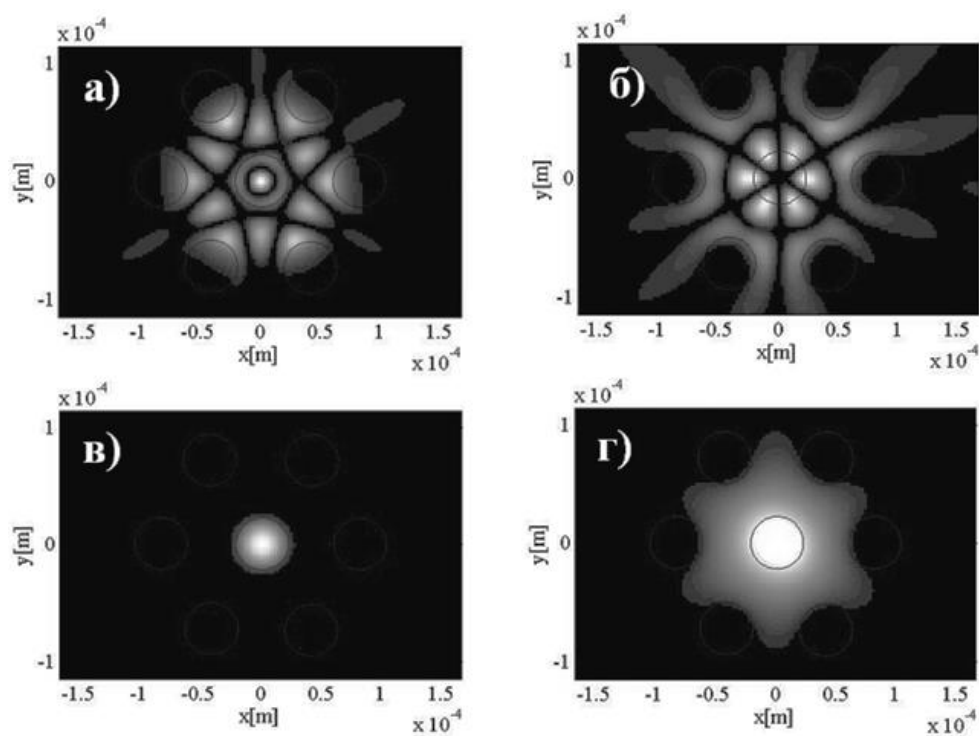


Рис. 3.2. Модели проходящего ЭМ-поля в поперечном сечении ФКС при различных  $\Delta n$ : а)  $\Delta n = 0,086$  при  $n_i = \text{AgBr}_{0,87}\text{Cl}_{0,17}$ ,  $n_m = \text{AgBr}_{0,95}\text{Cl}_{0,05}$ ,  $n_{ci} = \text{Ag}_{0,995}\text{Tl}_{0,005}\text{Br}_{0,995}\text{I}_{0,005}$ , порядок моды  $\text{LP}_{36}$ , б)  $\Delta n = 0,022$  при  $n_i = \text{AgBr}_{0,87}\text{Cl}_{0,17}$ ,  $n_m = \text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$ ,  $n_{ci} = \text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$ , порядок моды  $\text{LP}_{23}$ , в)  $\Delta n = 0,04$  при  $n_i = \text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$ ,  $n_m = \text{AgBr}_{0,95}\text{Cl}_{0,05}$ ,  $n_{ci} = \text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$ , порядок моды  $\text{LP}_{01}$ , г)  $\Delta n = 0,026$  при  $n_i = \text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$ ,  $n_m = \text{AgBr}_{0,95}\text{Cl}_{0,05}$ ,  $n_{ci} = \text{Ag}_{0,995}\text{Tl}_{0,005}\text{Br}_{0,995}\text{I}_{0,005}$ , порядок моды  $\text{LP}_{01}$

Первые («а» и «б») из представленных на рис. 3.2 моделей симулируют световоды, работающие в одномодовом режиме, однако пропускаемая по волокну мода обладает высоким порядком ( $LP_{36}$ ,  $LP_{23}$ ). Моды высокого порядка обладают большими энергиями, чем фундаментальные, из чего следует, что в ФКС составов «а» и «б» возникают большие потери энергии на удержание мод низшего порядка, т. е. существенные потери в поперечном сечении волокна. Распределение излучения в сечении данных световодов отлично от гауссовского, что в совокупности с высокими потерями делает ФКС представленных составов непригодными для применения. Фотонно-кристаллический световод состава  $n_i = \text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$ ,  $n_m = \text{AgBr}_{0,95}\text{Cl}_{0,05}$ ,  $n_{ci} = \text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$  удерживает все проходящее излучение внутри центральной вставки, что говорит о большой разности показателей преломления  $n_c - n_m$ . Данный ФКС пропускает фундаментальную моду без существенных потерь в конфайнменте, однако диаметр пучка переданного излучения совпадает с диаметром вставки, что говорит о преимуществе полного внутреннего отражения над механизмом фотонных запрещенных зон. Таким образом, данный световод является неэффективным, так как не позволяет получить на выходе излучение фундаментальной моды с большим диаметром пучка. Требованиям к ФКС полностью отвечает только световод составом периферийных вставок  $\text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$ , матрица  $\text{AgBr}_{0,95}\text{Cl}_{0,05}$ , центрального включения  $\text{Ag}_{0,995}\text{Tl}_{0,005}\text{Br}_{0,995}\text{I}_{0,005}$ , так как пропускает излучение без потерь энергии в поперечном сечении с гауссовским пучком диаметром 80-90 мкм.

На основании исследования влияния показателей преломления на режим работы ФКС был сделан вывод о необходимости подбора близких по составу и оптическим свойствам материалов, а также об изучении дополнительных факторов, влияющих на порядок мод и площадь проходящего поля.

## **3.2. Исследование структуры поля моды в зависимости от размера вставок и межвставочного расстояния**

### ***3.2.1. Конфигурация и оптические свойства световодов***

Для исследования модовой дисперсии в зависимости от размера вставок и межвставочного расстояния в световодах на основе галогенидов серебра могут быть приняты различные структуры световодов,

отличающиеся конфигурацией включений, количеством колец ФЗЗ, наличием центрального дефекта. Особенностью световодов на основе галогенидов серебра является ограниченность по количеству колец вставок: в связи с высокой сложностью изготовления таких ФКС производство волокон с более чем двумя кольцами вставок становится неразрешимой технической задачей. В связи с этим могут быть изготовлены только ФКС с одним и двумя кольцами вставок. Кроме того, считается, что гексагональное расположение периферийных включений является наиболее эффективным по компактности строения структуры. Дополнительно для сравнения могут быть изготовлены световоды с ФЗЗ октагональной конфигурации.

В связи с приведенными выше уточнениями для определения зависимости модовой дисперсии от геометрических особенностей структуры были выбраны волокна с одним и двумя кольцами вставок с гекса- и октагональной структурой. Данные о геометрии поперечного сечения приведены в табл. 3.2.

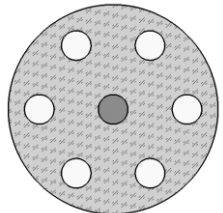
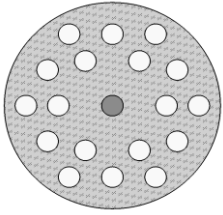
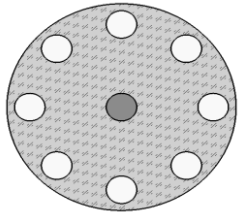
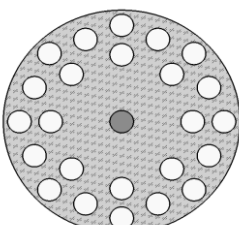
При моделировании необходимо варьировать размеры диаметров волокна и вставок, межвставочного расстояния (т. е. степени заполнения волокна) при постоянной конфигурации и химическом составе кольцевых включений и центрального дефекта. В рассматриваемых ниже примерах материалы кольцевых вставок и центрального дефекта выбирались на основе систем  $\text{AgBr} - \text{AgCl}$  и  $\text{AgBr} - \text{ТII}$  соответственно, что обосновано их оптическими свойствами и потенциальной возможностью создания инфракрасного одномодового световода диаметром 100–200 мкм с широким полем моды.

Для компьютерной симуляции необходимо задать следующие оптические параметры: показатели преломления матрицы  $n_m$ , кольцевых вставок  $n_i$  и центрального дефекта  $n_{ci}$ , так, чтобы сохранялось соотношение  $n_i < n_m < n_{ci}$ , а также длина волны проходящего излучения.

Диаметры кольцевых вставок во всех случаях изменялись от 30 до 40 мкм с шагом в 2,5 мкм, а также соотношение  $d_i/\Lambda_i$  между диаметром кольцевых вставок  $d_i$  и расстоянием между их осями  $\Lambda_i$  – от 0,1 до 0,5. Диаметр сердцевин ФКС в гекса- и октагональной структуре с одним кольцом периферийных вставок в моделировании принимался в диапазоне от 50 до 200 мкм. Длина волны передаваемого излучения – 10,6 мкм.

Таблица 3.2

## Конфигурации ФКС для компьютерной симуляции

Структура	Число вставок	Геометрия
Гексагональная	1 кольцо 7 вставок	
Гексагональная	2 кольца 19 вставок	
Октагональная	1 кольцо 8 вставок	
Октагональная	2 кольца 25 вставок	

### 3.2.2. Фазовая диаграмма и критерий отсечки одномодового режима

При изменении диаметров включений и межвставочного расстояния изменяется и относительный размер вставки  $d_i/\Lambda_i$ , который непосредственно влияет на степень заполнения волокна и модовую дисперсию. Дополнительно, для связи длины волны проходящего излучения со структурой волокна, определяют отношение  $\lambda/\Lambda_i$  – нормализованную длину волны. По отношениям  $d_i/\Lambda_i$  и  $\lambda_i/\Lambda_i$  строится график, называемый фазовой диаграммой, на которую накладывается кривая отсечки, разделяющая многомодовый и одномодовый режимы работы [2–6].

Рассмотрим галогенидсеребряный ФКС со следующими параметрами структуры: диаметры вставок  $d_i = 16$  мкм, межвставочные рас-

стояния  $\Lambda_i = 24,0 \dots 84,0$  мкм при гексагональном расположении кольцевых вставок и  $\Lambda_i = 19,7 \dots 65,8$  мкм при октагональном. Для каждой конфигурации определим соответствующие нормализованные длины волн  $\lambda_i/\Lambda_i$ , значения которых варьировались от 0,11 до 0,36 для гексагональной структуры и от 0,17 до 0,47 для октагональной. По полученным данным построим графики, визуализирующие критерий отсечки для каждой структуры, т. е. значения  $d_i/\Lambda_i$ , при которых происходит переход от многомодового режима к одномодовому, в том числе и к «бесконечно» одномодовому, как показано на рис. 3.3 [2, 3].

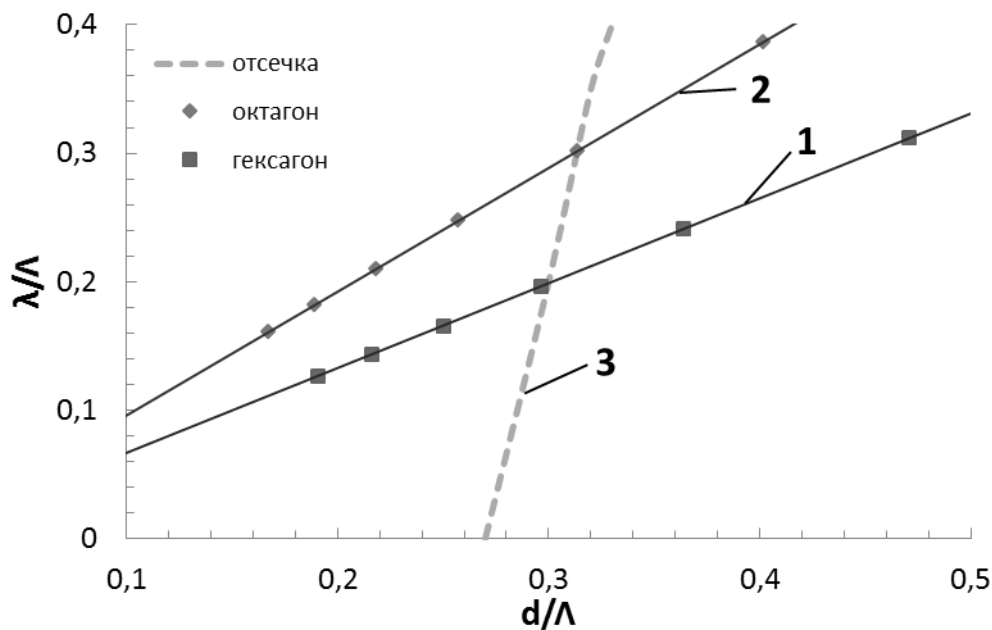


Рис. 3.3. Фазовая диаграмма перехода от многомодового режима к одномодовому: 1 – гексагональная структура вставок, 2 – октагональная структура вставок, 3 – граница раздела (отсечка). Точками выделены экспериментальные значения при заданной длине волны  $\lambda=10,6$  мкм

Критерий отсечки отражает количество вставок и межвставочное расстояние, при которых можно ожидать ФКС с одномодовым режимом работы и увеличенным полем моды: все точки, расположенные левее линии отсечки соответствуют одномодовым световодам, в то время как точки справа от границы раздела – многомодовым. Для дальнейшего проектирования ФКС следует выбирать параметры световода, а именно отношения  $d_i/\Lambda_i$ ,  $\lambda_i/\Lambda_i$ , в соответствии с фазовой диаграммой.



### **3.2.3. Моделирование световодов с гексагональной конфигурацией вставок**

При проектировании ФКС гексагональной структуры с помощью компьютерного моделирования предварительно необходимо выполнить:

- изучение влияния диаметра вставок на модовый состав проходящего излучения и отбор наиболее эффективных оптических параметров;
- исследование зависимости площади поля моды от межвставочного расстояния;
- оценку и расчет оптических характеристик, нелинейных свойств и потерь.

Также предварительно необходимо отобрать составы с близкими по величине показателями преломления, чтобы обеспечить маломодовый режим работы исследуемых световодов и получить одномодовые ФКС с увеличенным полем моды.

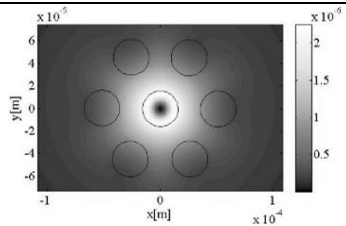
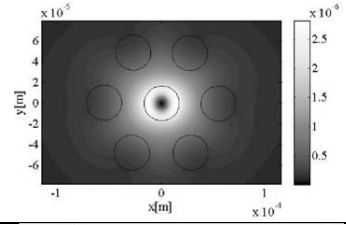
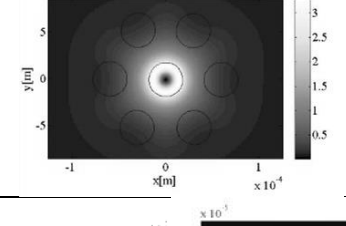
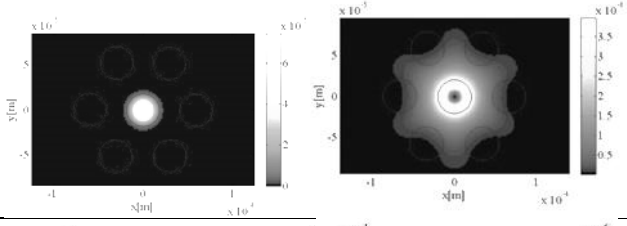
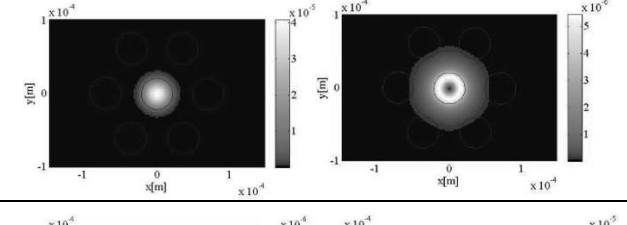
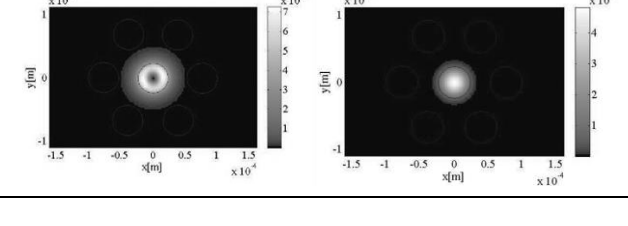
В качестве примера исследования зависимости модовой дисперсии от диаметра вставок рассмотрим 7 конфигураций световодов с составом периферийных вставок –  $\text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$ , матрицы –  $\text{AgBr}_{0,95}\text{Cl}_{0,05}$ , центрального включения –  $\text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$ , обеспечивающих малую разность показателей преломления матрицы – кольцевых вставок, матрицы – центрального включения. Результаты компьютерной симуляции приведены в табл. 3.3.

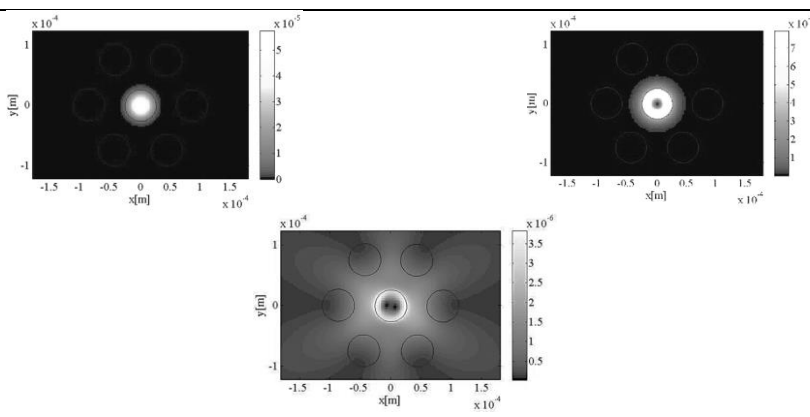
Очевидно, что при увеличении диаметра вставок уменьшается площадь поля моды низшего порядка: увеличивается количество мод и их порядок, излучение максимальной интенсивности концентрируется в сердцевине ФКС. Данные явления связаны с величиной диаметра включений, так как с увеличением  $d_i$  растет длина «отражающей» поверхности ФЗЗ. Однако при больших диаметрах вставок увеличивается мощность излучения, удерживаемого центральной вставкой, так как по данному включению за счет полного внутреннего отражения проходят моды более высокого порядка, что возникает при диаметре  $d_{ci}$ , превышающем длину волны проходящего излучения. Таким образом, по световоду с  $d_{ci} = 45$  мкм передается большая энергия, чем в ФКС с диаметром вставок менее 45 мкм. Увеличенная площадь поля моды для ФКС из табл. 3.3 достигается за счет перетекания излучения

из центрального дефекта в матрицу, что возникает при близких значениях показателей преломления и, следовательно, составах.

Таблица 3.3

Моделирование ФКС с гексагональной структурой при различных диаметрах вставок

$d_i$ , мкм	Число и ин- дексы мод	Модель
1	2	3
30	1 $LP_{02}$	
32,5	1 $LP_{02}$	
35	1 $LP_{02}$	
37,5	2 $LP_{01}, LP_{02}$	
40	2 $LP_{01}, LP_{02}$	
42,5	2 $LP_{01}, LP_{02}$	

1	2	3
45	3 LP <sub>01</sub> , LP <sub>02</sub> , LP <sub>12</sub>	

В результате моделирования были получены структуры с увеличенным полем моды, наиболее эффективной из которых оказалась структура с диаметром вставок 37,5 мм, соотношением  $d_i/\Lambda_i = 0,6$  и составом кольцевых вставок  $\text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$  при  $n_i = 2,153$ , матрицы  $\text{AgBr}_{0,95}\text{Cl}_{0,05}$  при  $n_m = 2,161$  и центрального дефекта  $\text{Ag}_{0,99}\text{Ti}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$  при  $n_{ci} = 2,167$ . Световод данной конфигурации работает в маломодовом режиме (2 моды) и передает излучение с гауссовским распределением пучка (при суперпозиции мод). Результат суперпозиции мод и распределение интенсивности проходящего излучения в поперечном сечении световода представлены на рис. 3.4.

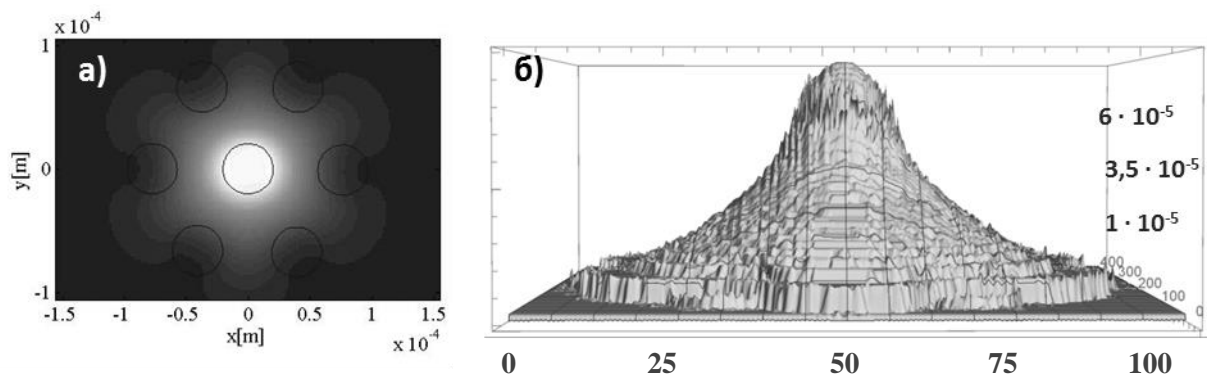


Рис. 3.4. Распределение интенсивности в поперечном сечении ФКС в результате суперпозиции мод при диаметре вставок 37,5 мкм:  
а) двумерная модель, б) трехмерная модель

При исследовании модовой дисперсии в зависимости от межвставочного расстояния также является удобным предварительное применение компьютерной симуляции.

Рассмотрим примеры волокон с диаметром кольца вставок в диапазоне от 50 до 200 мкм с шагом 20 мкм и вставками 11, 16,

20 мкм. Для моделирования предварительно отбираем три набора составов, наиболее эффективных для передачи ИК-излучения длиной 10,6 мкм в одномодовом режиме:

1. 98 мол.% AgBr в AgCl при  $n_m = 2,161, 93$  мол.% AgBr в AgCl при  $n_i = 2,149, 0,9$  мол.% TlI в AgBr при  $n_c = 2,172$ .

2. 98 мол.% AgBr в AgCl при  $n_m = 2,161, 93$  мол.% AgBr в AgCl при  $n_i = 2,149, 0,5$  мол.% TlI в AgBr при  $n_c = 2,167$ .

3. 95 мол.% AgBr в AgCl при  $n_m = 2,153, 93$  мол.% AgBr в AgCl при  $n_i = 2,149, 0,9$  мол.% TlI в AgBr при  $n_c = 2,172$ .

Для каждого набора составов смоделируем 24 структуры, на основании которых будет выполнена оценка изменения режима передачи излучения с увеличением межвставочного расстояния, а также оценены и рассчитаны нелинейные эффекты и потери в поперечном сечении. Результаты симуляции для второго состава представлены в табл. 3.4, расчетные характеристики – в табл. 3.5.

По табл. 3.4 наиболее явные зависимости поля моды от межвставочного расстояния просматриваются для ФКС с диаметром вставок 11 и 16 мкм. При диаметре 20 мкм с увеличением  $\Delta_i$  происходят резкие изменения в проходящей моде с полным изменением ее структуры и порядка. Световоды с диаметрами вставок 11 и 16 мкм работают в одномодовом режиме и обладают увеличенным диаметром проходящего пучка, однако в первой группе ФКС с увеличением диаметра сердцевинки наблюдается уменьшение площади моды, во второй – увеличение. Данные зависимости связаны с передаваемой по световоду энергией: ФКС с центральным дефектом диаметром 11 мкм удерживает меньшую энергию ЭМ-волны, чем волокно с диаметром включений 16 мкм.

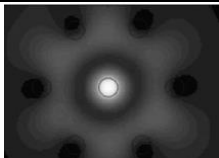
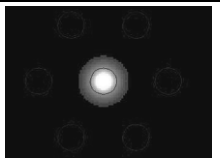
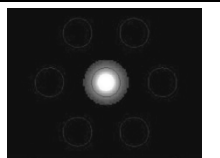
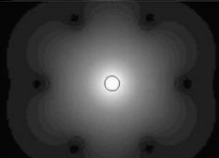
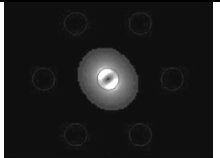
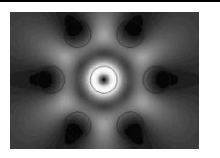
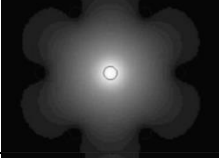
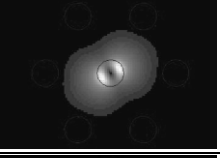
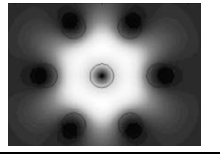
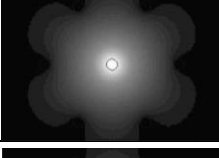
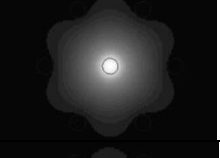
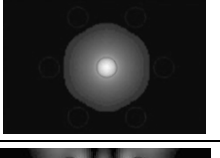
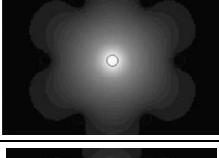
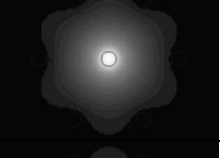
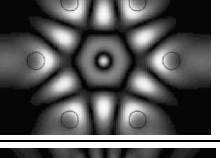
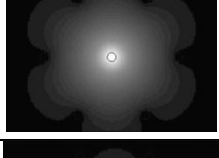
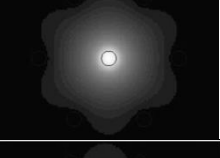
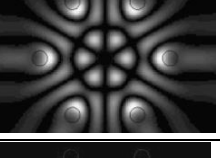


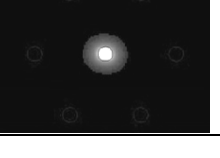
В связи с этим при прочих равных параметрах световод с  $d_{ci} = 11$  мкм достигает наибольшей площади моды при диаметрах сердцевинки  $D = 140...160$  мкм, при больших значениях  $D$  энергия рассеивается в поперечном сечении волокна, а именно в матрице. В то же время ФКС с  $d_i = 16$  мкм достигает максимальной площади пучка при  $D = 180...200$  мкм без существенных потерь на удержание моды в поперечном сечении, что подтверждает пропускание центральным включением энергии большей мощности.

По световодам третьей группы с диаметром вставок 20 мкм передается энергия наибольшей из исследованных ФКС мощности, что способствует возникновению нелинейных эффектов: фазовой

само модуляции и вынужденного комбинационного рассеяния (рамановского).

Таблица 3.4

Результаты моделирования для ФКС составом  $\text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$  при  $n_m = 2,161$ ,  $\text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$  при  $n_i = 2,149$ , центрального дефекта 0,5 мол.% ТП в AgBr при  $n_{ci} = 2,167$

D, мкм	Диаметр вставки, мкм		
	11	16	20
80			
100			
120			
140			
160			
180			
200			

Первый эффект возникает в результате изменения показателей преломления в поперечном сечении и приводит к самофокусировке (при увеличении диаметра сердцевинки от 120 до 140 мкм и от 180 до 200 мкм) и саморасфокусировке (при увеличении диаметра от 80 до 100 мкм и от 140 до 180 мкм) пучка. Данное явление может быть управляемым, в связи с чем широко применяется в системах связи для

оптического переключения и усиления радиочастот, что наиболее актуально для видимого диапазона длин волн. Второй эффект – рамановское комбинационное рассеяние – связан с поглощением проходящего излучения материалом волокна и приводит к возникновению перекрестных помех внутри материала и оптическим потерям. Данный эффект существенен при передаче излучения большой энергии и при использовании сборки волокон, таким образом, ФКС с большим диаметром центральной вставки более подвержен рассеянию излучения и помехам, чем первые две группы световодов.

Таблица 3.5

Расчет нелинейных эффектов в ФКС гексагональной структуры

D, мкм	Диаметр вставки, мкм								
	11			16			20		
	$n_{eff}$	$\alpha$ дБ/м	$k''$ , $10^{-12}$	$n_{eff}$	$\alpha$ дБ/м	$k''$ , $10^{-12}$	$n_{eff}$	$\alpha$ дБ/м	$k''$ , $10^{-12}$
80	2,151– 0,0043i	0,02	1767,11	2,162	0	3665,07	2,162	0	13881,5
100	2,161	0	237,80	2,163	0	493,54	2,161	0	1869,3
120	2,162	0	32,71	2,163	0	67,83	2,160	0	256,9
140	2,162	0	4,62	2,163	0	9,45	2,163	0	35,8
160	2,156	0	0,60	2,163	0	1,33	2,159– 0,00003i 2,164	0,009	5,0
180	2,162	0	0,09	2,163	0	0,19	2,156– 0,00015i 2,164	0,008	0,7
200	2,161– 0,0006i 2,162	0,03	0,01	2,161– 0,0011i 2,163	0,05	0,03	2,156– 0,00016i 2,162	0,001	0,1

Фазовая самомодуляция возникает при больших потерях в поперечном сечении волокна, таким образом, для оценки данного эффекта необходимо определить мнимую часть эффективного показателя преломления, как показано в табл. 3.5. Рассеяние излучения в материале ФКС также оценивается параметром  $\alpha$  и коэффициентом связи мод  $k''$ , позволяющим рассчитать помехи между отдельными модами и индивидуальными волокнами в сборке.

Из табл. 3.5 можно увидеть, что мнимая часть показателя преломления появляется в двух случаях:

- при существенных потерях излучения в матрице волокна;
- при повышении порядка моды.

Для ФКС с вставками диаметром 11 мкм встречаются оба варианта модуляции поля моды. Для волокон с сердцевинной  $D = 80$  мкм наличие мнимого показателя преломления говорит о моде  $LP_{02}$  нефундаментальной, что приводит к расфокусировке излучения и существенным потерям в матрице. Кроме того, для данной структуры значительной является величина коэффициента связи мод, которая вызвана малым диаметром сердцевинны и приводит к сосредоточению максимальной интенсивности излучения в центре структуры и сильным перекрестным помехам при использовании данных световодов в качестве элементов волоконной сборки. Для ФКС с сердцевинной  $D = 200$  мкм мнимая часть эффективного показателя преломления говорит только о потерях в матрице волокна  $\alpha = 0,03$  дБ/м, что подтверждается ограниченностью площади поля моды (площадь поля достигает максимального значения в 140–160 мкм и далее не увеличивается).

Для микроструктурированных световодов второй группы с  $d_i = 16$  мкм мнимая часть показателя наблюдается только при  $D = 200$  мкм, что приводит к появлению существенных потерь  $\alpha = 0,05$  дБ/м в матрице волокна. Интересно, что для структур с  $D = 80...120$  мкм площадь поля моды значительно меньше, чем у ФКС с  $D = 140...200$  мкм. Данный эффект связан с большой величиной коэффициента  $k''$ . Кроме того в структурах с  $D = 100...120$  мкм повышается порядок моды до  $LP_{11}$  и изменяется фаза проходящего излучения (см. табл. 3.4), что говорит о фазовой самомодуляции пучка. Данное свойство не было обнаружено при моделировании эффективного показателя преломления в связи с выставленным в программе SMTP ограничением поиска мод с величиной мнимой части не менее  $10^{-7}$  для исключения ложных решений. Так как при  $D = 100...120$  мкм не наблюдается существенных потерь в поперечном сечении волокна и резкого изменения порядка моды, мнимая часть эффективного показателя преломления имела малую величину и при моделировании не отразилась.

Для ФКС третьей группы с  $d_i = 20$  мкм аналогично предыдущим структурам наблюдаются расфокусировка излучения и повышение

порядка моды при  $D = 100; 120; 160; 180$  мкм, потери в поперечном сечении волокна  $\alpha = 0,009 \dots 0,001$  дБ/м при  $D = 160 \dots 200$  мкм, а также самомодуляция пучка при больших значениях коэффициента  $k''$  в световодах с  $D = 80 \dots 120$  мкм.

Таким образом симуляция фотонно-кристаллических световодов в SMTP позволяет исследовать по полученным при моделировании графическим зависимостям не только модовую дисперсию, но и потенциально возможные нелинейные эффекты: от расфокусировки пучка и фазовой самомодуляции до потерь в матрице волокна.

Полученные модели подтверждают возможность создания инфракрасных ФКС с увеличенным до 180–200 мкм диаметром поля фундаментальной моды. При оценке площади поля моды можно наблюдать увеличение диаметра поля более чем в 10 раз по сравнению с размерами вставок, что позволяет передавать излучение с диаметром пучка до 160–180 мкм. Также при увеличении диаметров вставок наблюдаются существенные изменения в структуре мод, что связано с нелинейными эффектами внутри волокна. Таким образом, для получения фотонно-кристаллического световода с увеличенным полем моды необходимо выполнять включения максимально большого диаметра, позволяющие передавать излучение без существенного вклада фазовой самомодуляции и комбинационного рассеяния.

#### ***3.2.4. Моделирование световодов с октагональной конфигурацией вставок***

Проектирование ФКС октагональной структуры периферийных вставок также осуществляется с помощью моделирования, позволяющего подобрать геометрические и оптические параметры для изготовления волокна и оценить его будущие свойства.

В первую очередь необходимо исследовать зависимость модовой дисперсии от состава и диаметров вставок световода при неизменных прочих параметрах. Рассмотрим компьютерную симуляцию ФКС с октагональной структурой кольцевых вставок при следующих параметрах конфигурации: диаметр кольцевых вставок и центрального дефекта  $d_i = d_{ci} = 11; 13; 16; 19; 22$  мкм, диаметр сердцевины световода  $D = 100$  мкм, длина волны  $\lambda = 10,6$  мкм. Для моделирования было отобрано 5 наборов составов кольцевых периферийных вставок, матрицы и центрального включения, как показано в табл. 3.6.



Таблица 3.6

Исследуемые составы ФКС с октагональной конфигурацией  
периферийных вставок

№ состава	Кольцевые вставки	Матрица	Центральная вставка
1	$\text{AgBr}_{0,87}\text{Cl}_{0,13}$	$\text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$	$\text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$
2	$\text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$	$\text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$	$\text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$
3	$\text{AgBr}_{0,95}\text{Cl}_{0,05}$	$\text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$	$\text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$
4	$\text{AgBr}_{0,87}\text{Cl}_{0,13}$	$\text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$	$\text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$
5	$\text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$	$\text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$	$\text{Ag}_{0,98}\text{Tl}_{0,02}\text{Br}_{0,98}\text{I}_{0,02}$

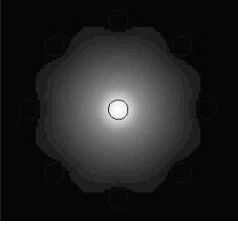
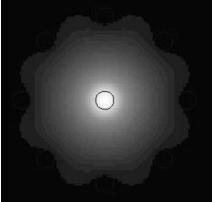
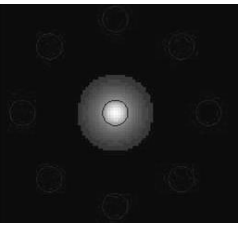
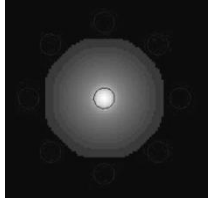
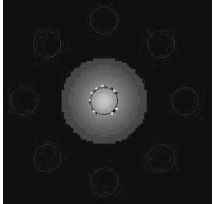
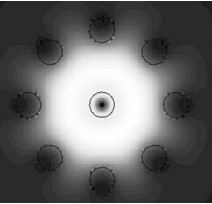
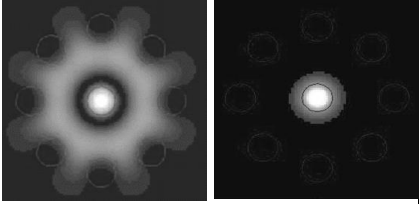
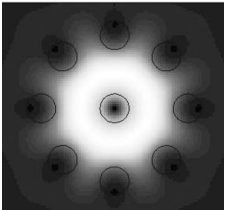
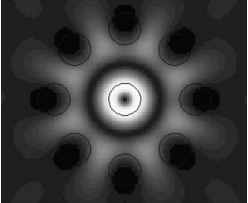
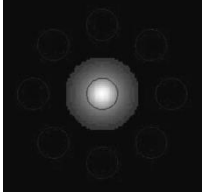
Выбор данных составов также обоснован малой разностью показателей преломления ( $\Delta n < 0,04$ ) между матрицей и вставками. Результаты моделирования для составов №1 и №2 при различных диаметрах вставок представлены в табл. 3.7. Данные составы наиболее интересны с целью рассмотрения свойств проектируемых световодов, а также позволяют получить ФКС с увеличенным полем моды.

Для каждого из составов при каждой величине диаметра включений  $d_i$  определялись число мод  $N$  и их индексы, эффективный показатель преломления, по которому далее рассчитывались потери в матрице волокна и коэффициент связи мод (табл. 3.7 и 3.8).

По полученным моделям можно увидеть, что с увеличением диаметров вставок уменьшается площадь поля моды, количество и порядок мод увеличивается, в некоторых случаях наблюдаются расфокусировка излучения (при  $d_i$  16–22 мкм). Чтобы оценить возникающие эффекты, необходимо рассмотреть полученные при симуляции эффективные показатели преломления, приведенные в табл. 3.8.

Таблица 3.7

# Зависимость интенсивности поля моды проходящего по световоду излучения от диаметра вставок ФКС

$d_i$	N, индексы мод	Состав № 1	N, индексы мод	Состав № 2
11	1 $LP_{01}$		1 $LP_{01}$	
13	1 $LP_{01}$		1 $LP_{01}$	
16	1 $LP_{01}$		1 $LP_{01}$	
19	2 1 $LP_{01},$ $LP_{02}$		1 $LP_{02}$	
22	1 $LP_{03}$		1 $LP_{01}$	

Данные из табл. 3.8 подтверждают графическое представление моделей распространения излучения, представленных в табл. 3.7, так как, действительно, при диаметрах вставок  $d_i = d_{ci} = 11$  мкм эффективные показатели преломления не имеют мнимой составляющей, что говорит о минимальных потерях  $\alpha \approx 0$  дБ/м в матрице ФКС обоих составов. Далее, в световодах каждого состава начинает появляться мнимая часть показателя преломления, т. е. возникают потери  $\alpha$  в поперечном сечении волокна, приводящие к уменьшению площади поля моды, что особенно ярко проявляется при диаметрах вставок

$d_i$  13–16 мкм ( $\alpha = 2,2 \cdot 10^{-6} \dots 5,7 \cdot 10^{-6}$  дБ/м для состава №1;  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \dots 5,4 \cdot 10^{-6}$  дБ/м для состава №2). Известно, что с увеличением диаметра центральной вставки увеличивается количество энергии, переданной по световоду, так как данное включение действует по принципам ПВО и удерживает излучение в сердцевине ФКС. В связи с этим при увеличении диаметра вставок растет мощность переданного излучения. Также при  $d_i$ , во много раз превышающем длину волны передаваемого излучения, увеличивается количество мод излучения. Таким образом, при  $d_i > 16$  мкм наблюдается увеличение порядка и количества мод. При большом значении мнимой части эффективного показателя преломления для ФКС состава №2 при  $d_i = 22$  мкм потери в матрице  $\alpha = 720,4 \cdot 10^{-6}$  дБ/м, в связи с чем все излучение теряется в матрице волокна без увеличения количества и порядка мод.

Таблица 3.8

Расчет нелинейных эффектов в ФКС октагональной структуры

$d_i$	$n_{\text{eff}}$	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , дБ/м	$k'' \cdot 10^{-10}$
Состав №1			
11	2,161	0,0	8,83
13	$2,161 - 2,6 \cdot 10^{-5}i$	2,2	4,43
16	$2,161 - 1,1 \cdot 10^{-6}i$	5,7	1,85
19	$2,1624 - 0,3 \cdot 10^{-7}i$	0,2	0,89
22	$2,156 - 0,8 \cdot 10^{-7}i$	0,4	0,47
Состав №2			
11	2,159	0,0	976,73
13	$2,161 - 0,31 \cdot 10^{-6}i$	1,6	496,18
16	$2,161 - 1,04 \cdot 10^{-6}i$	5,4	212,73
19	$2,1624 - 3,9 \cdot 10^{-5}i$	200,7	8,95
22	$2,156 - 0,14 \cdot 10^{-3}i$	720,4	4,79

Компьютерное моделирование показало увеличение порядка моды с увеличением размеров включений, таким образом, для пере-

дачи фундаментальной моды (низшего порядка) необходимо изготавливать ФКС с минимально достижимыми диаметрами вставок, что соответствует фазовой диаграмме и выводам о ФКС с гексагональной структурой вставок.

Из полученных моделей распределения интенсивности в поперечном сечении фотонно-кристаллического световода наиболее интересными являются волокна составом периферийных включений  $\text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$ , матрицы  $\text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$ , центральной вставки  $\text{Ag}_{0,99}\text{Ti}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$ . Полученные модели показали возможность увеличения диаметра поля моды до 4 раз относительно центрального дефекта (с диаметром центральной вставки 11 мкм) при одномодовом режиме передачи излучения.

В случае октагональной конфигурации кольцевых вставок особый интерес представляют световоды с диаметрами вставок 19 мкм. В этом случае происходит повышение порядка моды, однако наблюдается существенное увеличение диаметра пучка (до 85 мкм). Падение интенсивности проходящего излучения в центральном дефекте, говорит о высоком уровне энергии пропускаемой ЭМ-волны, достаточном для преодоления границы раздела «матрица – центральное включение». Равномерность распределения излучения в поперечном сечении ФКС может быть достигнута путем уменьшения диаметра центральной вставки до 15–17 мкм при неизменных размерах кольцевых включений.

### ***3.2.5. Моделирование ФКС с двумя кольцами вставок***

ФКС с несколькими кольцами вставок впервые были разработаны для кварцевых волокон с целью увеличения селективности микроструктурированных световодов, увеличения мощности передаваемой энергии и механической прочности, а также снижения потерь на удержание моды в поперечном сечении. Высокая селективность фотонно-кристаллических световодов позволяет осуществлять отбор излучения по его частоте и интенсивности из широкого диапазона электромагнитных волн и таким образом изготавливать волоконные частотные фильтры. Способность к фокусированию излучения в сердцевине ФКС с увеличением количества колец вставок также повышается с параллельным снижением влияния фазовой самомодуляции. Данное свойство наиболее важно для волоконных систем с большой длиной

зонда, так как позволяет передавать излучение без искажения оптического сигнала [7–10].

Проектирование фотонно-кристаллических световодов с двумя кольцами вставок также целесообразно начать с моделирования и оценки оптических свойств будущего волокна. Подбор оптических и геометрических параметров волокна должен осуществляться с помощью исследования зависимостей модовой дисперсии от состава, разности показателей преломления элементов структуры, размера включений и межвставочного расстояния, примеры определения которых были рассмотрены в предыдущих разделах. В данном разделе будут рассмотрены примеры графических моделей распространения излучения в поперечном сечении световодов с двумя кольцами вставок гекса- и октагональной структуры и описаны режимы передачи и возникающие в них нелинейные свойства.

Для исследования режимов передачи ИК-излучения рассмотрим ФКС с двумя кольцами вставок с окта- и гексагональными конфигурациями. Для гексагональной структуры принимались отношения диаметров внутреннего  $D_{\text{вн}}$  к наружному  $D_{\text{нар}}$  кольцу вставок  $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}}$ : 80/150, 100/130 мкм, для октагональной структуры – 100/120, 100/130, 100/150 мкм. Диаметр вставок составил 16 мкм, длина волны проходящего излучения – 10,6 мкм. Моделирование производилось для составов, представленных в табл. 3.9. Результаты моделирования представлены в табл. 3.10.

Таблица 3.9

Составы ФКС с двумя кольцами периферийных вставок

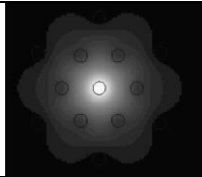
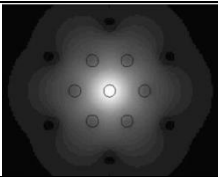
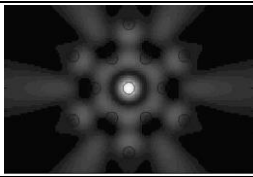
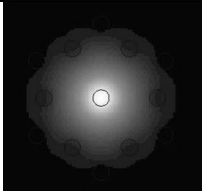
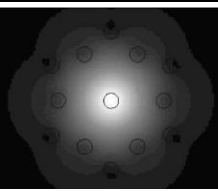
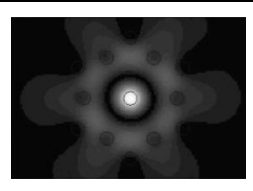
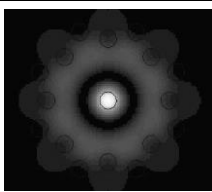
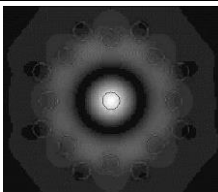
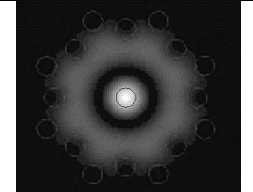
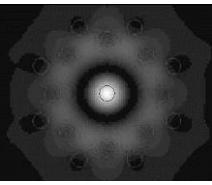
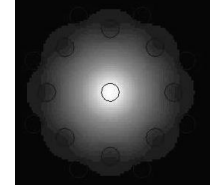
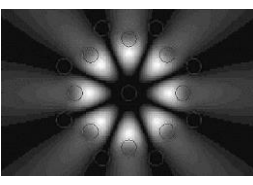
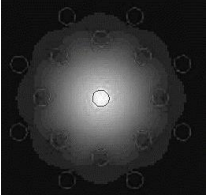
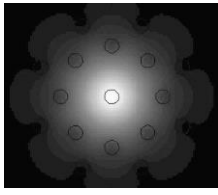
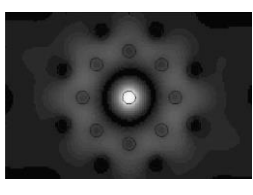
№ состава	Кольцевые вставки	Матрица	Центральная вставка
1	$\text{AgBr}_{0,93}\text{Cl}_{0,07}$	$\text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$	$\text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$
2	$\text{AgBr}_{0,95}\text{Cl}_{0,05}$	$\text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$	$\text{Ag}_{0,995}\text{Tl}_{0,005}\text{Br}_{0,995}\text{I}_{0,005}$
3	$\text{AgBr}_{0,87}\text{Cl}_{0,13}$	$\text{AgBr}_{0,98}\text{Cl}_{0,02}$	$\text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$

Представленные в табл. 3.10 модели показывают, что фотонно-кристаллические световоды с двумя кольцами вставок также способствуют увеличению диаметра поля фундаментальной моды с полным заполнением сердцевины в конфигурациях: 80/150 и 100/130 – гексагональной составом №1 и №2, 100/150 – октагональной составами

№ 2 (при  $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}}$  100/130) и №3. Поле моды при этом полностью заполнило внутреннее кольцо вставок. Остальные структуры не передают моду низшего порядка, однако во всех случаях поле моды является увеличенным, что говорит о малых потерях в матрице, однако не исключает фазовую самомодуляцию и расфокусировку пучка.

Таблица 3.10

Результаты моделирования ФКС с двумя кольцами вставок

Структура $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}}$	Состав № 1	Состав № 2	Состав № 3
Гексагональная 80/150			
Гексагональная 100/130			
Октагональная 100/120			
Октагональная 100/130			
Октагональная 100/150			

По полученным двумерным моделям были построены трехмерные изображения распределения интенсивности в поперечном сечении световода с целью сравнения с гауссовскими зависимостями (рис. 3.5). Результаты показали близкие к Гауссу распределения энергии по диаметру ФКС с большими энергиями, чем в световодах с одним кольцом вставок. По рис. 3.5 видно, что распределение интенсивности по диаметру фотонно-кристаллического световода близко к гауссовскому. В

результате моделирования ФКС с двумя кольцами вставок можно сделать вывод о возможности получения волокон с увеличенным диаметром поля моды с сердцевинной, полностью заполненной полем моды.

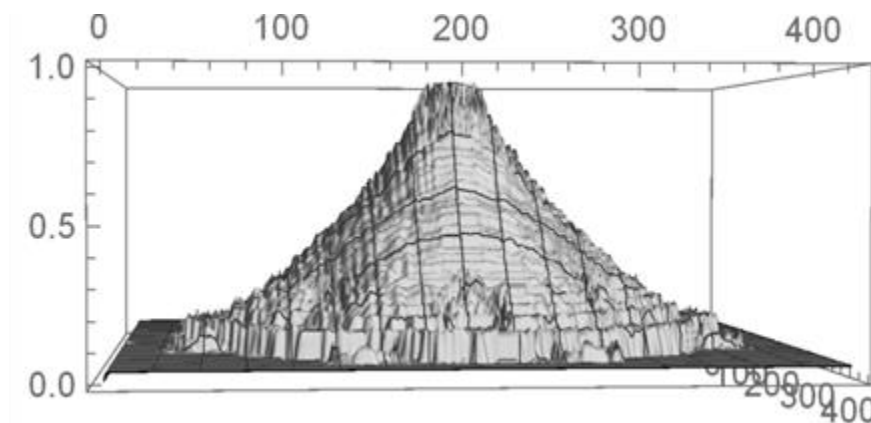


Рис. 3.5. Трехмерные изображения распределения интенсивности проходящего излучения в поперечном сечении ФКС

Моделирование эффективных показателей преломления позволит численно оценить потери и возможную нелинейность в световодах с двумя кольцами вставок. Селективные и прочностные свойства таких ФКС можно рассчитать только после их изготовления.

### Выводы по главе 3

В данной главе рассмотрено моделирование фотонно-кристаллических световодов с целью отбора оптимальных геометрических и оптических параметров световода до этапа его изготовления. Приведена фазовая диаграмма для световодов на основе галогенидов серебра.

Для подбора состава ФКС необходимо оценить количество мод и модовую дисперсию в зависимости от разности квадратов показателей преломления. После отбора составов микроструктурированного световода требуется задать его будущую конфигурацию: гекса- или октагональную, и с помощью моделирования исследовать оптические характеристики в зависимости от диаметров вставок и межвставочного расстояния.

В главе 3 рассмотрены примеры исследования зависимости модовой дисперсии от размера вставок и межвставочного расстояния как по графическим моделям распространения излучения в поперечном сечении ФКС, так и по эффективным показателям преломления, полученным в результате симуляции. По результатам исследования были ото-

браны оптимальные параметры для изготовления фотонно-кристаллических световодов гекса- и октагональной структуры, работающих в одномодовом режиме и передающих излучение с увеличенным полем моды.

Дополнительно были приведены ФКС с двумя кольцами вставок как потенциальные кандидаты для создания волоконных частотных фильтров за счет повышенной селективности. Рассмотрены возможные структуры таких световодов и приведены модели распространения излучения в ФКС с двумя кольцами включений гекса- и октагональной конфигурации.

### *Задачи*

1. Выполните моделирование однослойного (окруженного воздухом с  $n = 1$ ) с диаметром сердцевины  $d$  и гексагонального фотонно-кристаллического волокна с диаметрами сердцевины 100 мкм и включений  $d_i$  в программе SMTP при входных параметрах, соответствующих заданному варианту. Считать равными показатели преломления матрицы ФКС и сердцевины однослойного световода, а также  $d=d_i$ .

Данные для задачи 1

№ варианта	$d$ , мкм	$n_{ci}$	$n_m$	$n_i$
1	11	2,172	2,149	2,138
2	13	2,172	2,161	2,149
3	16	2,167	2,161	2,149
4	20	2,173	2,161	2,138
5	25	2,172	2,149	2,123
6	11	2,172	2,161	2,153
7	13	2,186	2,161	2,130
8	16	2,186	2,172	2,167
9	20	2,167	2,161	2,149
10	25	2,172	2,161	2,153

2. Определите по полученным моделям режим работы световодов (одномодовый или многомодовый) и эффективные показатели преломления. Вычислите нормированную частоту.



### *Библиографический список*

1. Шумкова, Д. Б. Специальные волоконные световоды / Д. Б. Шумкова, А. Е. Левченко. — Пермь : ПНИПУ, 2011. — 178 с.
2. Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers/ N. A. Mortensen, J. R. Folkenberg, M. D. Nielsen, K. P. Hansen // Opt. Lett. — 2003. — Vol. 28, № 7. — P. 1979-1881.
3. Kuhlmei, B. T. Modal cutoff in microstructured optical fibers / B. T. Kuhlmei, R. C. McPhedran, C. M. de Sterke // Opt. Lett. — 2002. — Vol. 27, № 19. — P. 1684-1686.
4. Vidne, Y. Spatial modes in a ФКС fiber generated continuum/ Y. Vidne, M. Rosenbluh // Opt. Exp. — 2005. — Vol. 13, № 24. — P. 9721-9728.
5. Renversez, G. Second mode transition in microstructured optical fibers: determination of the critical geometrical parameter and study of the matrix refractive index and effects of cladding size / G. Renversez, F. Bordas, B. T. Kuhlmei// Opt. Lett. — 2005. — Vol. 30, № 11. — P. 1264-1266.
6. Neilsen, M. D. Photonic crystal fiber design based on the V-parameter / M. D. Neilsen, N. A. Mortensen // Opt. Exp. — 2003. — Vol. 11, № 21. — P. 2762-2768.
7. Chiang, J. -S. Analysis of propagation characteristics for an octagonal photonic crystal fiber (O-ФКС) / J. -S. Chiang, T. -L. Wu // Opt. Commun. — 2006. — Vol. 258. — P. 170-176.
8. Dong, L. Leakage channel optical fibers with large effective area / L. Dong, X. Peng, J. Li // J. OSA B. — 2007. — Vol. 24, № 8. — P. 1689-1697.
9. Sarma, T. V. S. An active core fiber optic sensor for detecting trace H<sub>2</sub>S at high temperature using a cadmium oxide doped porous silica optical fiber as a transducer / T. V. S. Sarma, S. Tao // Sensors and Actuators B. — 2007. — Vol. 127. — P. 471-479.
10. Microstructured active phosphate glass fibers for fiber lasers / A. Schülzgen [et al.] // J. Lightwave Technol. — 2009. — Vol. 27, № 11. — P. 1734-1740.

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОДНО- И МНОГОМОДОВЫХ ИК-СВЕТОВОДОВ

Кристаллы на основе твердых растворов галогенидов серебра и одновалентного таллия негигроскопичны, пластичны, не обладают эффектом спайности, поэтому из них получают методом экструзии волоконные световоды для среднего инфракрасного диапазона. Метод экструзии был обоснован Курнаковым еще в 1813 году.

#### 4.1. Технология изготовления нанокристаллических ИК-световодов

Для вытягивания NIR и MIR оптических волокон, состоящих из сердцевины и оболочки, в основном используют такие разновидности горячей экструзии, как вытягивание из преформы (англ. preform-to-fiber) и коэкструзия сердцевины и оболочки (англ. multimaterial coextrusion) [1]. Первый метод предусматривает раздельное изготовления штабика и трубки (rod-in-tube), которые, будучи собраны в единую преформу, далее перетягиваются в волокно. Второй же метод заключается в одновременном размягчении материалов для сердцевины и оболочки и формировании их в оптическое волокно без необходимости получения преформы. Сложность этого подхода – чисто техническая: метод требует создания двойной фильеры с рядом подающих отверстий, тогда как первый подход нуждается лишь в простой фильере с единственным центральным отверстием. Исследования температурной зависимости вязкости известных оптических материалов показали, что наиболее пригодными для горячей экструзии являются кварц, фторцирконатные и халькогенидные стекла, а также полимеры [1]. Однако авторы [2–6] сообщали, что данный метод также пригоден для вытягивания волокон на основе галогенидов серебра.

##### 4.1.1. Экструзия световодов методикой «stack-and-draw»

Рассмотрим семистадийный алгоритм экструзии ФКС из кристаллов на основе твердых растворов галогенидов серебра (вне зависимости от состава), в котором абсолютно всё сечение волокна созда-

ется за счет конформного сжатия целой «поленницы» одно- и двухслойных волокон, а его микроструктуры – только двухслойных, так как однослойные дают монолитную часть матрицы, не участвующую в поддержании волоконных мод. Эволюция экструзии преформы, чей штабик впоследствии становится центральным дефектом АС ФКС, представлен на рис. 4.1. Сам алгоритм с учетом существующих экструзионных контейнеров можно представить в следующем виде:

- 1 этап – получение поликристалла с  $\varnothing$  14 мм из монокристалла с  $\varnothing$  16 мм. Согласно нашим представлениям, поликристалл выгоднее занимает предложенное пространство экструзионного контейнера, что должно предотвратить растрескивание заготовки и несимметричную деформацию при экструзии. Эта часть будет далее передавлена либо в однослойные волокна для «поленницы», либо в оболочку двухслойных волокон. Коэффициент перетяжки (отношение исходного диаметра к конечному) равен 1,14;

- 2 этап – получение поликристаллического стержня  $\varnothing$  2,8 мм из монокристалла с  $\varnothing$  14 мм. Стержень будет играть роль сердцевины двухслойных волокон, которые позже будут вставками микроструктуры. Очевидно, их два вида – с составом  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  для периферии и  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$  для центра. Коэффициент перетяжки – 5,0;

- 3 этап – получение однослойного волокна с  $\varnothing$  1,75 мм из поликристалла с  $\varnothing$  14 мм, полученного на стадии 1. Фрагменты этого волокна дадут монолитную часть матрицы ФКС. Коэффициент перетяжки – 8,0;

- 4 этап – получение двухслойного волокна с  $\varnothing$  1,75 / 0,35 мм для последующего «использования» в качестве фотонной структуры (два вида, см. этап 2). Коэффициент перетяжки – 8,0. Эта стадия схематично отражена на вставке рис. 4.1 (переход от левого изображения к среднему) и является примером вытягивания из преформы [1], в данном случае довольно простой;

- 5 этап – передавливание «поленницы» из одно- и многослойных волокон (всего 61 волокно, максимальное измерение гексагональной призмы насчитывает 9 волокон) в размягчённую «поленницу» с диаметром каждого элемента  $\varnothing$  1,53 мм (семь двухслойных в центре –  $\varnothing$  1,53 / 0,31 мм). Коэффициент перетяжки – 1,14. Эта стадия нужна для упорядочивания и закрепления элементов микроструктурированного волокна друг относительно друга, а также чтобы начать избавляться от воздуха между волокнами-«поленьями»;

- 6 этап – преобразование поддавленной полученной на предыдущем этапе «поленницы» в заготовку для волокна, где каждый элемент гипотетически (рассчитывается, что однослойные элементы уже станут монолитной структурой) будет иметь диаметр  $\varnothing 1,09$  мм для окружения и  $\varnothing 1,09 / 0,22$  мм для вставок микроструктуры. Коэффициент перетяжки – 1,4;

- 7 этап – вытягивание волокна с внешним диаметром  $\varnothing 0,5$  мм. Вставки микроструктуры волокна имеют диаметр  $\varnothing 11,0 – 11,1$  мкм, а межвставочное расстояние (равное диаметру волокон «поленницы») –  $\varnothing 54,5 – 55,5$  мкм. Коэффициент перетяжки – 20,0. Последние две стадии объединены на вставке рис. 4.1 (переход от среднего изображения к правому).

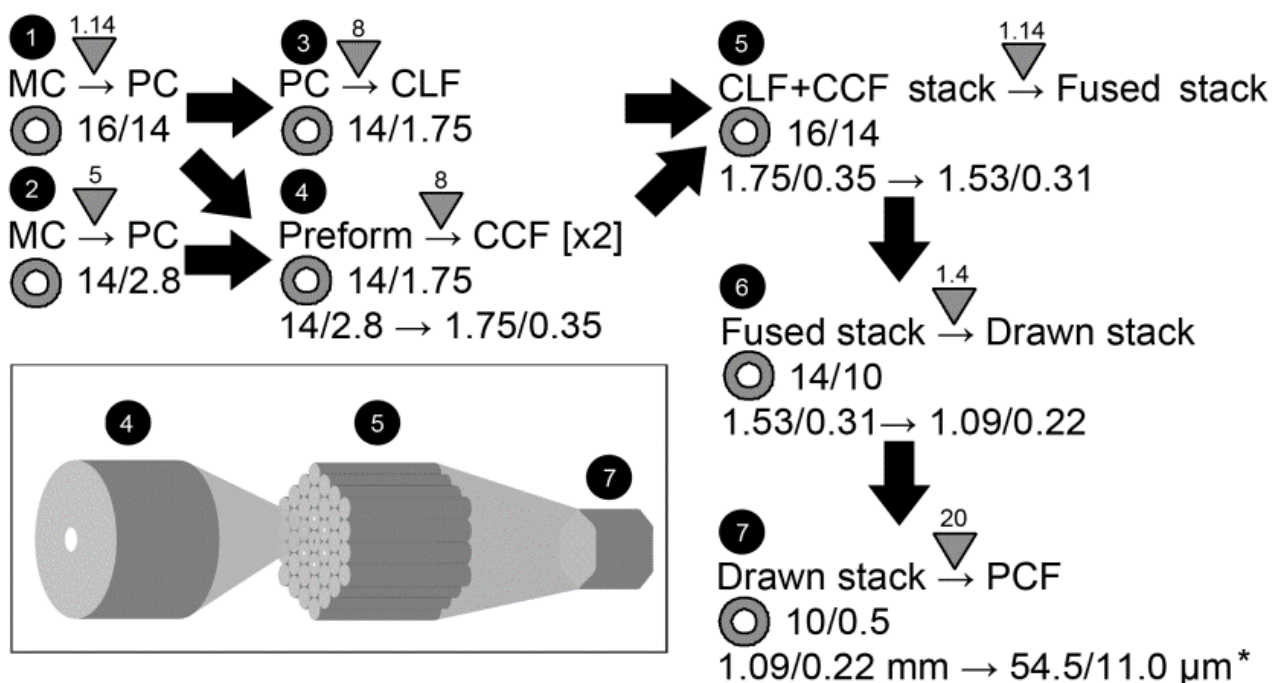


Рис. 4.1. Эволюция преформы для центральной вставки при экструзии «поленницы» по методике «stack-and-draw»

Для проверки данной методики был проведен эксперимент по вытягиванию микроструктурированного волокна на материале, близком по химическому составу –  $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$ , поэтому главным отличием этого эксперимента от алгоритма является то, что все применяемые на этапе 5 волокна являются однослойными (нет нужды в этапах 2 и 4).

В результате практической апробации было выявлено, что данная методика не приводит к желаемому результату на стадии 5. Так как контейнер и последующая направляющая позволяют податливому в

размягчённом состоянии материалу занять предлагаемое пространство, конечная форма размягчённой «поленницы» близка к цилиндрической, но разные слои материала покидают пространство контейнера с разной скоростью – сначала выходят осевые потоки, затем периферические; поэтому элементы структуры деформируются неоднородно и сжатие волокон «поленницы» не является конформным. Результирующая поленница оказалась несимметричной и рассыпчатой (рис. 4.2). Это привело к необходимости модифицировать используемую методику как минимум на пятом этапе.

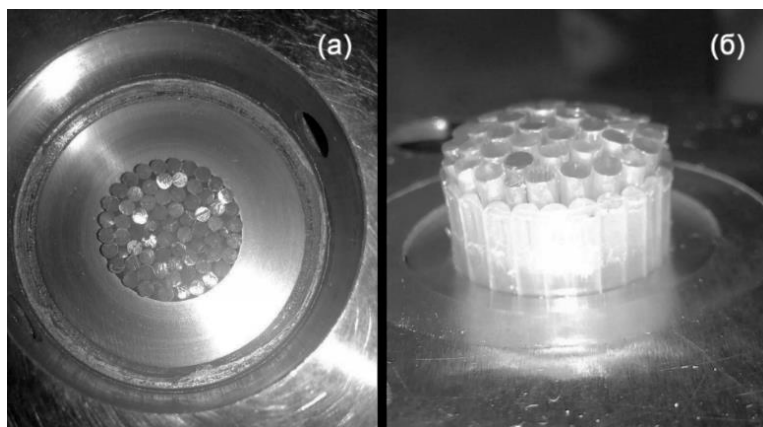


Рис. 4.2. К реализации методики *stack-and-draw*: а – загрузка контейнера; б – подплавленная поленница, передавленная несимметрично. Температура экструзии – 180 °С, давление – 1,2 – 1,6 МПа, средняя скорость экструзии – 0,4 мм / мин, длительность – 40 мин

#### ***4.1.2. Экструзия преформы-«поленницы» комбинированием методик «stack-and-draw» и «rod-in-tube»***

Модификация алгоритма экструзии поленницы из девяти рядов волокон состоит в сокращении количества рядов и использовании дополнительного внешнего цилиндра-трубки для более качественной центровки будущих элементов фотонной структуры волокна и для симметрии получаемого изделия. Таким образом, алгоритм сводится к следующим шести стадиям:

- 1 и 2 этапы такие же, что и в предыдущем случае;
- 3 этап – изготовление трубки с гексагональным призматическим отверстием с наибольшим измерением 5,4 мм. Это обуславливает отсутствие необходимости в одном дополнительном поддавлении «поленницы»;
- 4 этап аналогичен ему же в предыдущем алгоритме;

- 5 этап – использование методики вытягивания из преформы в виде штабика в трубке, где трубкой является полученный на этапе 3 цилиндр с призматическим отверстием, а штабиком является поленница из 7 волокон (максимальное измерение призмы – 3 волокна), которые будут играть роль центральной (1 шт.) и периферической (6 шт.) вставок микроструктуры конечного волокна. Таким образом, данная методика совмещает методы «stack-and-draw» и «rod-in-tube». Коэффициент перетяжки – 1,5. Конечные диаметры участвующих двухслойных волокон –  $\varnothing 1,09 / 0,22$  мм;

- 6 этап – получение волокна из полученной поддавленной сложной преформы. Коэффициент перетяжки – 20. На рис. 4.3, демонстрирующем превращения центральной вставки, отображены этапы 2, 4 и 5 + 5.

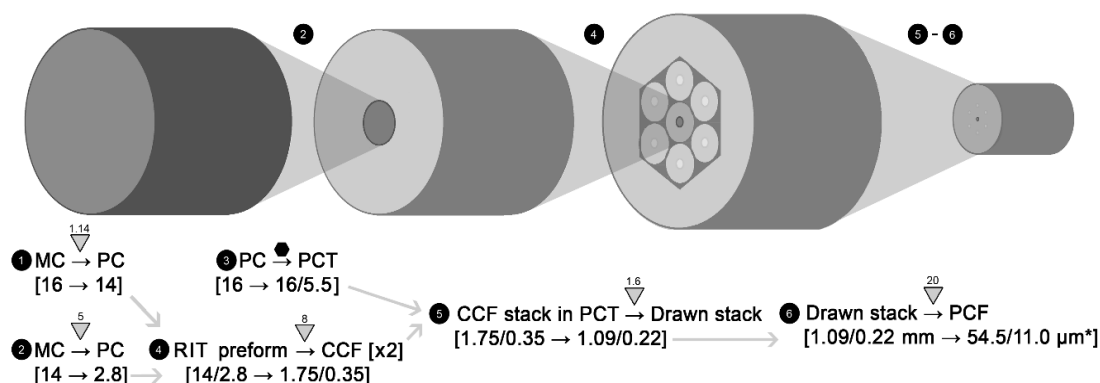


Рис. 4.3. Эволюция центральной вставки при объединении методик экструзии «rod-in-tube» и «stack-and-draw»

#### 4.1.3. Технология изготовления одно- и многослойных волоконных сцинтилляторов

Для регистрации ионизирующего излучения могут быть применены волоконные сцинтилляторы, обладающие рядом преимуществ над стандартными методиками исследования радиационного фона, а именно высокой чувствительностью (в т.ч. к  $\gamma$ -излучению), высокой температурой плавления в по сравнению с органическими сцинтилляторами, высокой скоростью счета и временной разрешающей способностью, возможностью использования счетчиков различных геометрических форм и размеров, обусловленных специальными условиями изготовления.

Сердцевину и оболочку волоконных сцинтилляторов изготавливают методом экструзии (выдавливания) из новых монокристаллических заготовок на основе твердых растворов галогенидов серебра  $\text{AgCl}_x\text{Br}_y\text{I}_{1-x-y}$ , легированных йодидом одновалентного таллия (ТII). Состав сердцевины имеет больший, по сравнению с оболочкой, показатель преломления ввиду повышенного содержания ТII, поэтому сцинтилляционное излучение преломляется на границе раздела сердцевина-оболочка и распространяется по сердцевине практически без потерь. Определенное содержание ТII в волокне обеспечивает наличие полосы люминесценции в диапазоне длин волн от 550 нм до 850 нм с максимумами свечения на 630 нм и 760 нм.

В некоторых приложениях эффективнее применять фотонно-кристаллическую структуру волоконных сцинтилляторов с ФЗЗ. Для данной структуры может быть применена гексагональная конфигурация световода на основе систем  $\text{AgBr}$  – ТII или  $\text{AgBr}$ – KRS-5, при максимальном показателе преломления центрального включения и наименьшем показателе у фотонных запрещенных зон.

Технология изготовления выбирается согласно структуре световода. Так для однослойного и двухслойного световодов экструзия выполняется по стандартным методикам вытягивания, для ФКС сцинтиллятора применяется комбинированный подход «rod-in-tube» и «stack-and-draw».

## 4.2. Экструзия волокна

Сначала был проведен пробный эксперимент на составе  $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$ . По получении воспроизводимой микроструктуры, подобрав температурные режимы экструзии для поддержания осевой однородности и равномерности истечения материала, необходимо изготовить микроструктурированные световоды на основе кристаллов твердых растворов галогенидов серебра и таллия в соответствии с результатами моделирования. Далее подробно будет представлена методика для получения ФКС именно по данному алгоритму с составами периферических вставок, матрицы и центрального дефекта соответственно  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ ,  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$  и  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$ .

### 4.2.1. Этап 1 – экструзия заготовки для материала матрицы

Целью данного этапа является получение заготовок для однослойных волокон, которые дадут основной объем матрицы волокна, а также для двухслойных волокон, причем данный материал послужит межвставочной прослойкой. Диаметр кристалла меняется с 16 до 14 мм. Элементы оснастки для экструзии на этом этапе представлены на рис. 4.4. Особенностью этапа является необходимость создания условий для полноценного прогрева оснастки, так как большой внутренний диаметр направляющей 7 способствует интенсивному охлаждению кристалла атмосферным воздухом. Для этих целей, во-первых, в контейнере 1 сначала размещалась заглушка из фторопласта 11 (обладает схожим с галогенидами серебра значением вязкости при температуре 200 °С) для блокирования подачи воздуха к кристаллу, а во-вторых, создавалось дополнительное утепление за счет коалиновой ваты для улучшения контакта нагревателя и оснастки, как на рис. 4.5. На рис. 4.6 показаны конечные кристаллы без блокировки воздушного охлаждения и с ним.

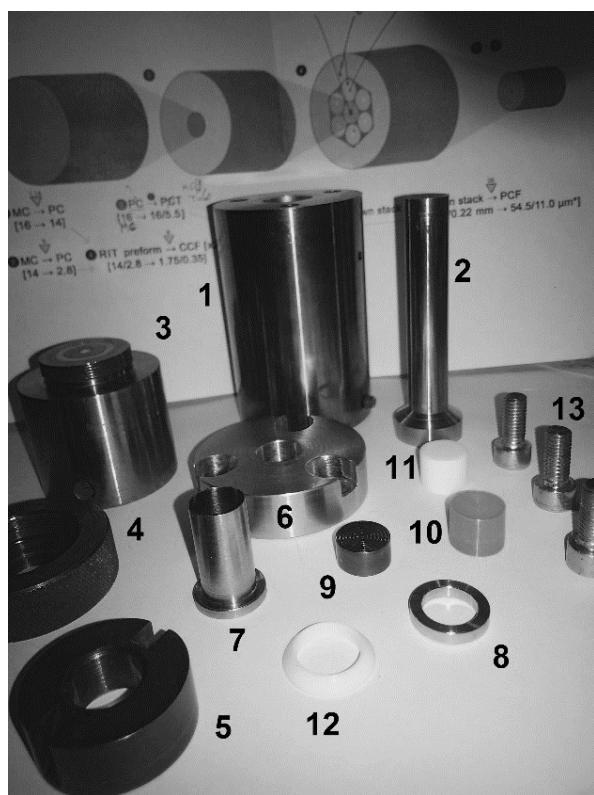


Рис. 4.4. Детали оснастки для первого этапа экструзии: 1 – контейнер; 2 – давящий плунжер; 3 – основание плунжера; 4 – накидная гайка на плунжер; 5 – направляющая плунжера; 6 – крепеж (направляющая для экструзионного плунжера); 7 – экструзионный плунжер (направляющая для передавливаемого элемента); 8 – фильера; 9 – заглушка; 10 – заготовка  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$ ; 11 – фторопластовая заглушка; 12 – уплотнительное кольцо; 13 – болты для соединения контейнера и крепежа



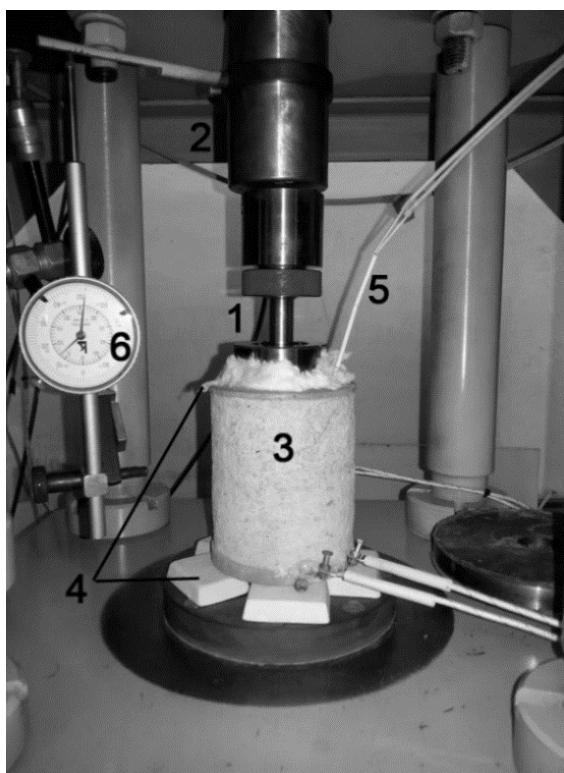


Рис. 4.5. Детали схемы  
экструзии:  
1 – оснастка с заготовкой;  
2 – давящий плунжер пресса;  
3 – трубчатый нагреватель  
сопротивления, связанный с  
ПИД регулятором температуры;  
4 – импровизированное  
утепление; 5 – термопара;  
6 – измеритель хода плунжера

Видно, что в первом случае кристалл получается мутным и несимметричным и с обилием трещин, тогда как во втором случае он прозрачен и недеформирован.

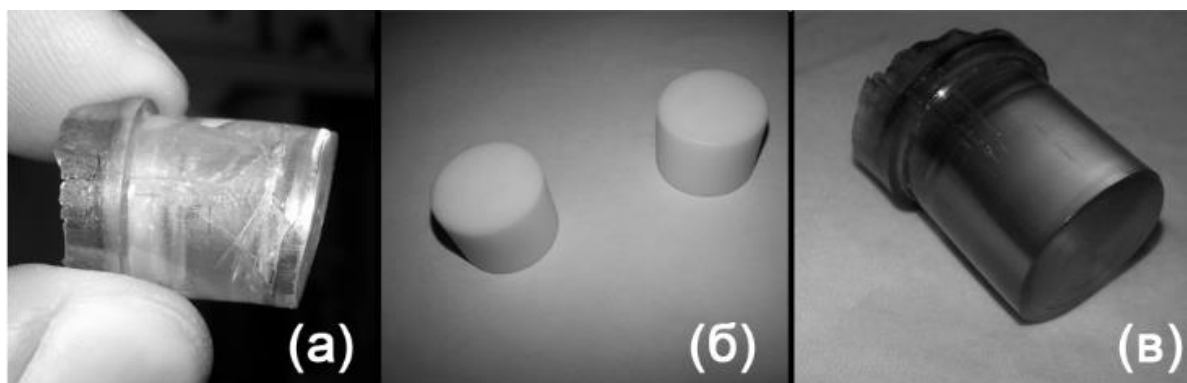


Рис. 4.6. Нивелирование доступа воздуха к заготовке во время экструзии:  
(а) – поликристалл без априорной защиты от контакта с воздухом;  
(б) – защитные фторопластовые заглушки; (в) – поликристалл, исходно  
защищенный от контакта с воздухом

Режимы экструзии представлены на рис. 4.7 для двух заготовок. На вставках к рисункам приведены фотографии полученных поликристаллов. Резкий скачок давления на рис. 4.7, а говорит о том, что в контейнере заканчивается материал. Из соображений техники безопасности следует избегать подобного явления.

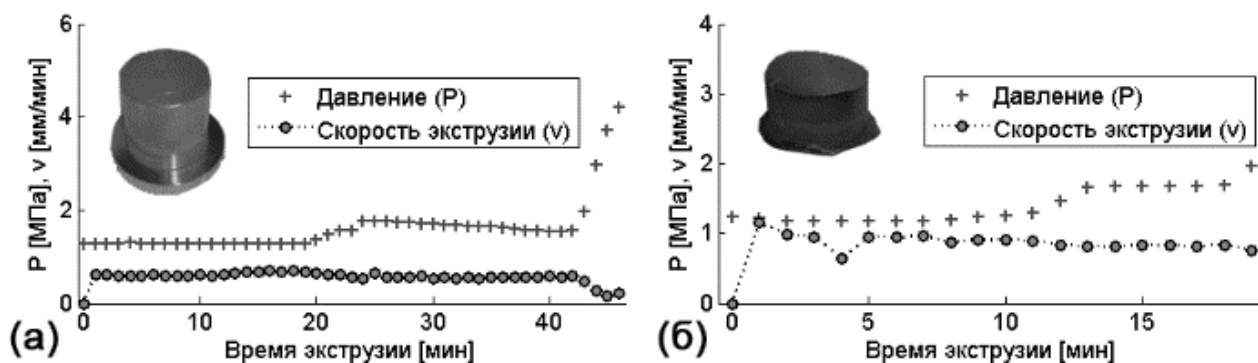


Рис. 4.7. Режимы экструзии поликристаллических заготовок  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$  на первом этапе: (а) – для монолитной части матрицы будущего волокна; (б) – для межвставочного пространства матрицы. Фотографии заготовок представлены на вставках. Температура процесса экструзии – 200 °С

#### 4.2.2. Этап 2 – экструзия заготовки для материала вставок

Результатом этапа 2 являются два поликристаллических стержня из  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  и  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$  внешним диаметром 2,8 мм, перетягиваемых экструзией из поли- либо монокристалла диаметром 14 либо 16 мм (в данном случае – монокристалл с  $\varnothing$  14 мм). Предназначение стержней – создание вставок микроструктуры. В данном случае нет необходимости в серьезном дополнительном утеплении за счет предотвращения воздушного охлаждения оснастки снизу (фторопластовая заглушка). Режимы экструзии обоих стержней построены на рис. 4.8, на вставках которого изображены фотографии полученных фрагментов волокна.

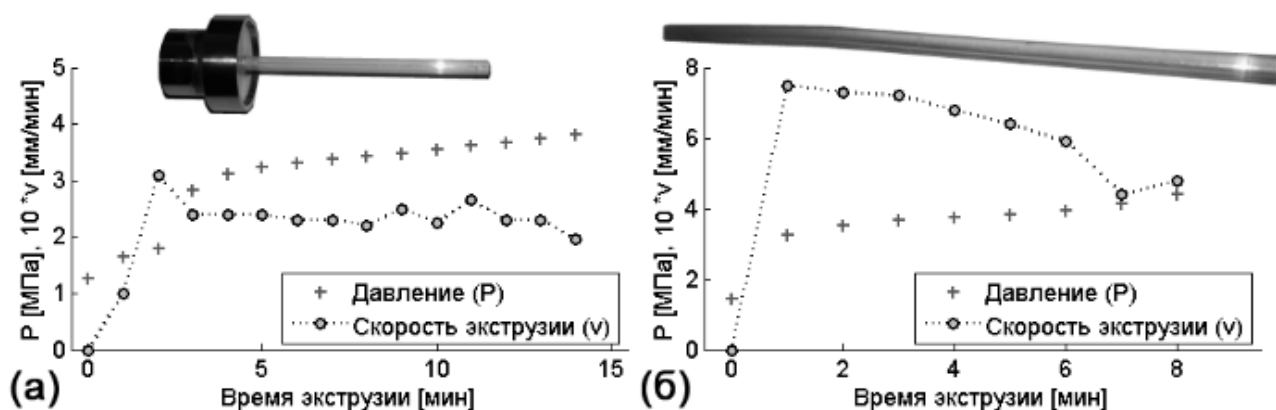


Рис. 4.8. Режимы экструзии поликристаллических стержней на втором этапе: (а) –  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$  для центральной вставки будущего волокна (фото в профиль); (б) –  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  для периферических вставок (фото профиля в перспективе). Температура процесса экструзии – 200 °С

### 4.2.3. Этап 3 – подготовка трубки для сложной преформы

Результатом этапа 3 является цилиндрическая трубка с отверстием в форме гексагональной призмы. Детали соответствующей оснастки приведены на рис. 4.9. Для получения такого отверстия был рассчитан и изготовлен плунжер 9, задача которого – расширить исходно высверленное осевое отверстие в заготовке. Особенность данного этапа экструзии в том, что, во-первых, нас интересует не продукт экструзии, а нетронутый остаток, а во-вторых, возникла проблема снятия искомой трубки с плунжера, для чего плунжер был изготовлен разборным. Режим экструзии трубки вместе с фотографией конечного результата представлен на рис. 4.10.

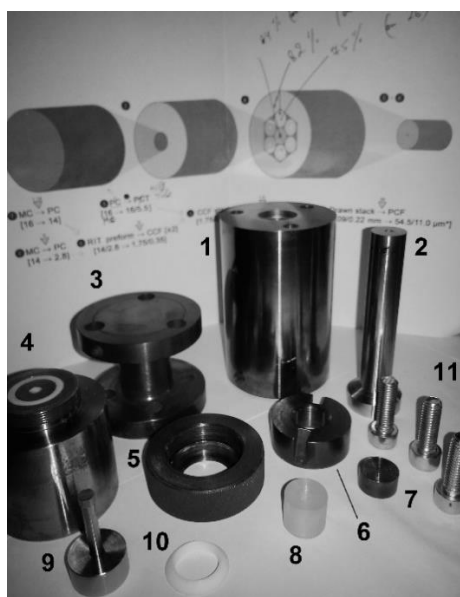


Рис. 4.9. Детали оснастки для третьего этапа экструзии: 1 – контейнер; 2 – давящий плунжер; 3 – переходный элемент между контейнером и прессом; 4 – основание плунжера; 5 – накидная гайка на плунжер; 6 – направляющая для плунжера; 7 – заглушка; 8 – заготовка с продольным отверстием  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$ ; 9 – разборный гексагональный дорн (плунжер); 10 – уплотнительное кольцо; 11 – болты для соединения контейнера и переходного элемента

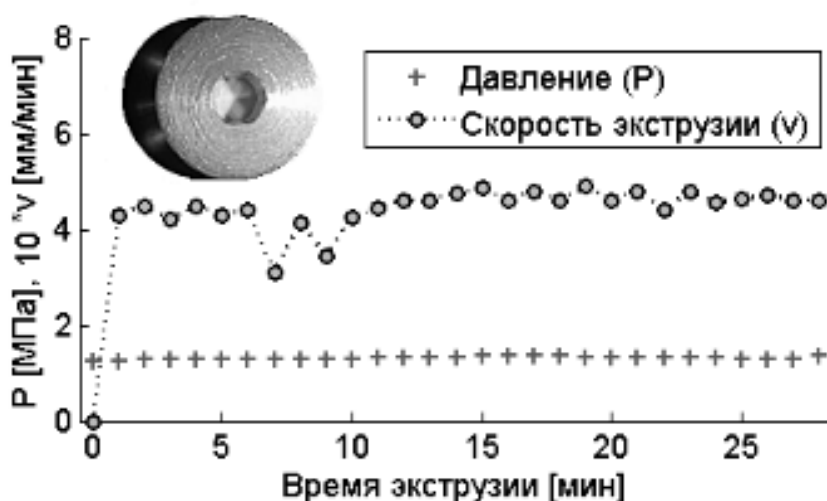


Рис. 4.10. Режим выпрессовывания гексагональной призмы из заготовки  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$  на третьем этапе для получения трубки для методики «rod-in-tube». Температура процесса экструзии – 200 °C

#### 4.2.4. Этап 4 – перетягивание простой преформы методом «rod-in-tube»

На данном этапе преформа из сегмента стержней, полученных на этапе 2, в качестве штабика и кристаллов, полученных на этапе 1, с высверленными продольными отверстиями (по одному в каждом) в качестве трубки перетягивается до волокон с внешним диаметров 1,75 мм. На рис. 4.11 приведена преформа 10 в собранном и разобранном состояниях. Режимы экструзии построены на рис. 4.12. Резкий скачок скорости является начальным режимом экструзии, когда пресс еще не коснулся оснастки. Торцовка производилась торцовочной машинкой со стальным (либо алмазным) диском и возможностью регулировать длину волоконного сегмента с погрешностью  $\pm 0,1$  мм.

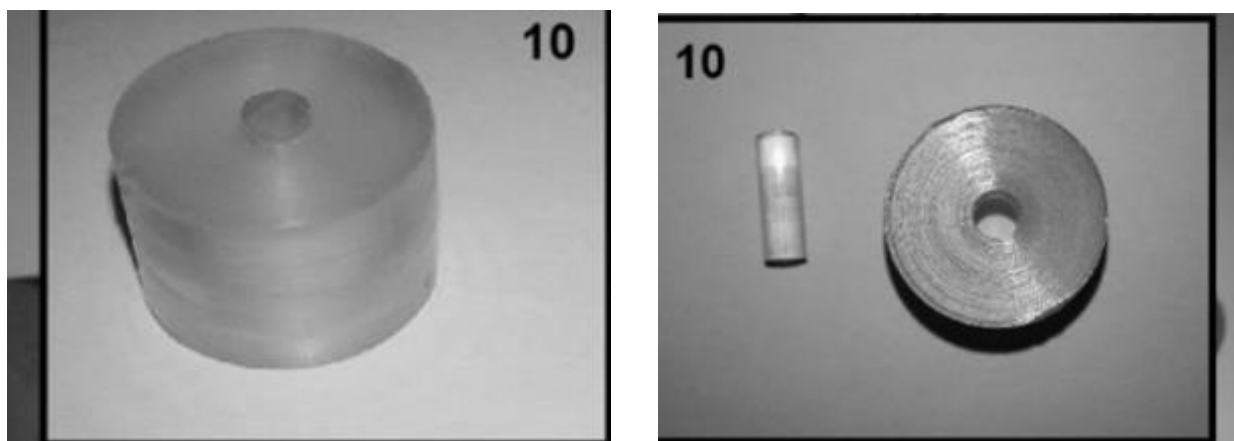


Рис. 4.11. Заготовка-преформа в собранном и разобранном состояниях

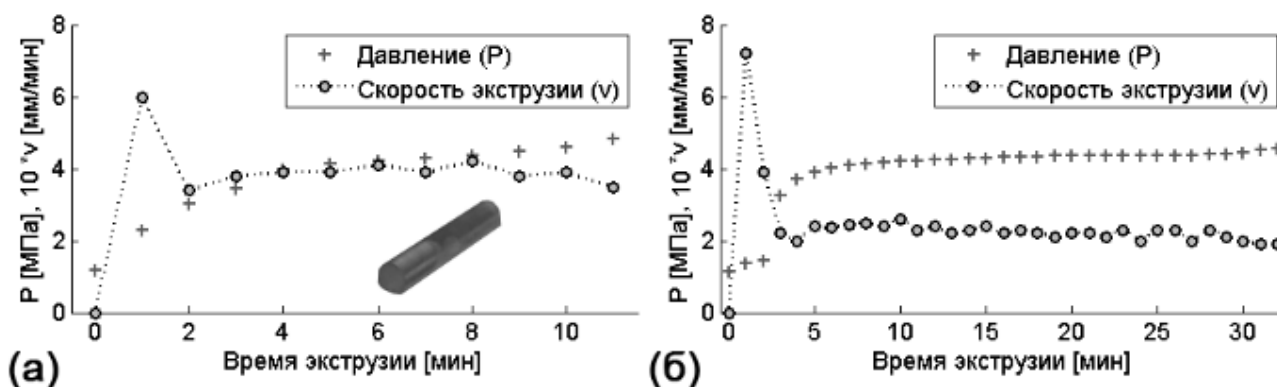


Рис. 4.12. Режимы экструзии двухслойных волокон на четвертом этапе:  
 (а) –  $\text{AgCl}_{0.16}\text{Br}_{0.84}$  для центральной вставки будущего волокна (приведено фото лишь малого фрагмента); (б) –  $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$  для периферических вставок.  
 Температура процесса экструзии – 200 °С

#### 4.2.5. Этап 5 – перетягивание составной преформы методом «rod-in-tube» со «штабиком-поленницей»

Этап является комбинацией методов «rod-in-tube» и «stack-and-draw». Второй метод при этом отвечает за штабик для первого. Трубка с гексагональной воздушной призмой, полученная на этапе 3, заполняется семью малыми фрагментами двух видов волокон, полученных на этапе 4. Особенностью этого этапа является уже заметное нарушение продольной однородности структуры, которое будет обсуждено далее. Режим экструзии приведен на рис. 4.13 вместе с фотографией полученной передавленной преформы.

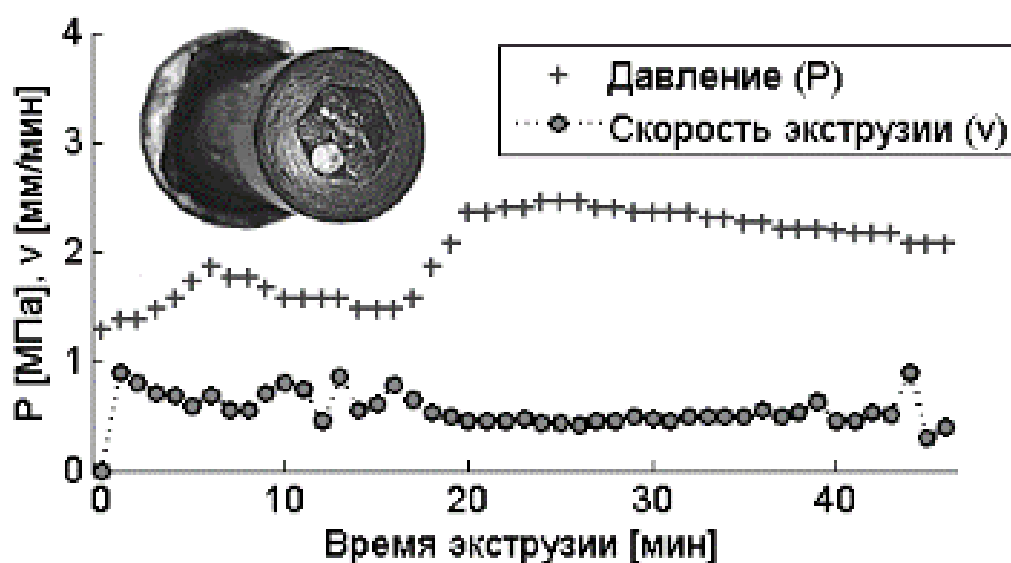


Рис. 4.13. Режим экструзии (на пятом этапе) составной преформы.  
Температура процесса экструзии 200 °С

#### 4.2.6. Этап 6 – получение микроструктурированного волокна

Финальный этап заключается в вытягивании волокна с внешним диаметром 0,5 мм. Как и предыдущий этап, этот сопровождается необходимостью нивелировать продольную неоднородность полученной микроструктуры (см. далее). В данном случае экструзия является обратной, что означает, что вытягиваемое волокно проходит через экструдированный поршень, являющийся для него направляющей. Таким образом, оснастка размещается с поворотом на 180°. Режим экструзии представлен на рис. 4.14. Скачок скорости означает, что давящий плунжер прессы еще не пришел в контакт с оснасткой.

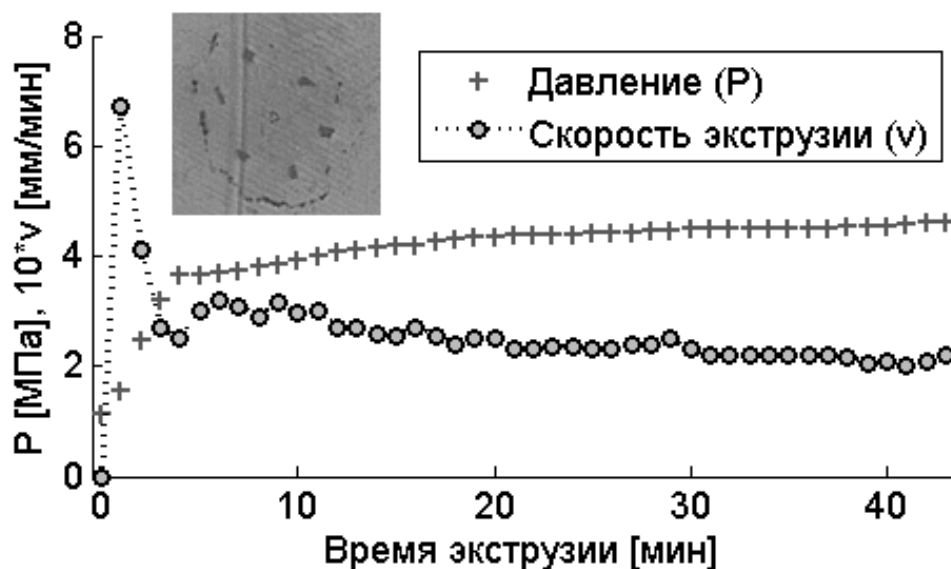


Рис. 4.14. Режим экструзии конечного микроструктурированного волокна. На вставке приведен пример профиля фотонной структуры на середине волокна, полученного из фрагмента преформы с наибольшей продольной однородностью микроструктуры. Температура процесса экструзии – 200 °С

### 4.3. Поддержание продольной однородности микроструктуры

При передавливании мягкой и податливой преформы возникает проблема выдерживания однородности диаметра сердцевины по длине будущего волокна, а также идеальной геометрии формы ее профиля [7]. Методика коэкструзии с использованием двойной фильеры позволяет получать бóльшую однородность структуры по длине. К примеру, этим методом было получено двухметровое волокно (см. рис. 4.3) с неоднородностью границы раздела «серцевина – оболочка» всего 0,3 % при величине диаметра оболочки 900 мкм, сердцевины 755 мкм, и лишь с небольшой перетяжкой в середине, чей размер отклонялся от торцов на 0,8 %. При этом геометрия торцов была почти идеальной. Однако в отличие от экструзии преформы, данный метод не позволяет получать двухмерную микроструктуру фотонно-кристаллического волокна. Первый метод («preform-to-fiber») частично может позволить, но при экструзии внутренние элементы структуры приобретают форму конуса (а не цилиндра) с выпуклой внутрь направляющей, что приводит к значительным отличиям диаметра на концах преформы и волокна.

### 4.3.1. Контроль диаметра элементов микроструктуры

Проблему выше можно проиллюстрировать с помощью фотографий на рис. 4.15 (микровизор  $\mu\text{Vizo-MET-221}$  (ООО «ЛОМО», Россия)). Видно, что и диаметр вставки, и значение шага микроструктуры на стадии преформы изменяется в довольно широких пределах. Размеры элементов микроструктуры уменьшаются неконформно в процессе экструзии так, что профиль этого изменения напоминает конус с кривой, вогнутой образующей, о чем можно судить даже качественно по рис. 4.15. Аналогичная конусность присуща и волокну. Из рис. 4.16 (металлографический микроскоп ЛОМО  $\mu\text{VISO 221}$ ) видно, что на торцах волокон существует некоторое отклонение в габаритах и симметрии микроструктуры волокон, полученных из разных участков преформы (БВ и ДЕ на рис. 4.15 для волокон АВ и ВГ соответственно). Конкретные значения всех габаритов можно оценить по рис. 4.17, на котором графически представлена неоднородность геометрии по длине штабика перетянутой преформы и конечного волокна для двух образцов волокна (пробного и экспериментального из преформы БВ). Первый (пробный) образец не имел вставок микроструктуры, а все элементы были выполнены из одного материала (близкого по составу) –  $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$ , как говорилось ранее. По этому образцу мы определили, какой величины отрезки преформы нужно изготовить, чтобы попасть в диапазон постоянных геометрических параметров вытягиваемого из нее волокна. Кроме того, пробное волокно показало, каким становится граница раздела между разными элементами микроструктуры. Несмотря на то, что эта граница различима в микроскоп, остатки воздуха и разные шероховатости имеют субмикронный размер, таким образом не заставляя свет с  $\lambda = 10,6$  мкм дифрагировать. Пробному образцу соответствуют рис. 4.17, а и 4.17, б. Наметив, какие части брать для каждого последующего этапа, мы обратились к искомому образцу. Ему соответствуют рис. 4.17, в – 4.17, д.

Для каждой стадии мы выбирали наиболее линейный и близкий к теоретическому значению участок графика для предыдущей стадии. Например, волокна (б) и (д) получены из наиболее близких к теоретическому расчету (желтый пунктир) отрезков преформ (а) и (г). Тем не менее отклонение от нелинейности наблюдалось в каждом акте экструзии. Действительно, материал сердцевины обычно выдавливается пер-

вым, обгоняя оболочку, что обусловило резкий скачок величины диаметра сердцевины до уровня диаметра оболочки. Далее за ним следовал материал оболочки, и примерно на середине длины их соотношение становилось идеальным, и оболочка равномерно обволакивала сердцевину. Но так как все материалы подавались в одном определенном соотношении, материал оболочки начинал превалировать ближе к концу экструзии, тогда как материал сердцевины начинал истощаться. Именно поэтому геометрические параметры сердцевинной части меньше расчетных в начале волокна, если за ноль длины взять торец, оставшийся в оснастке последним.

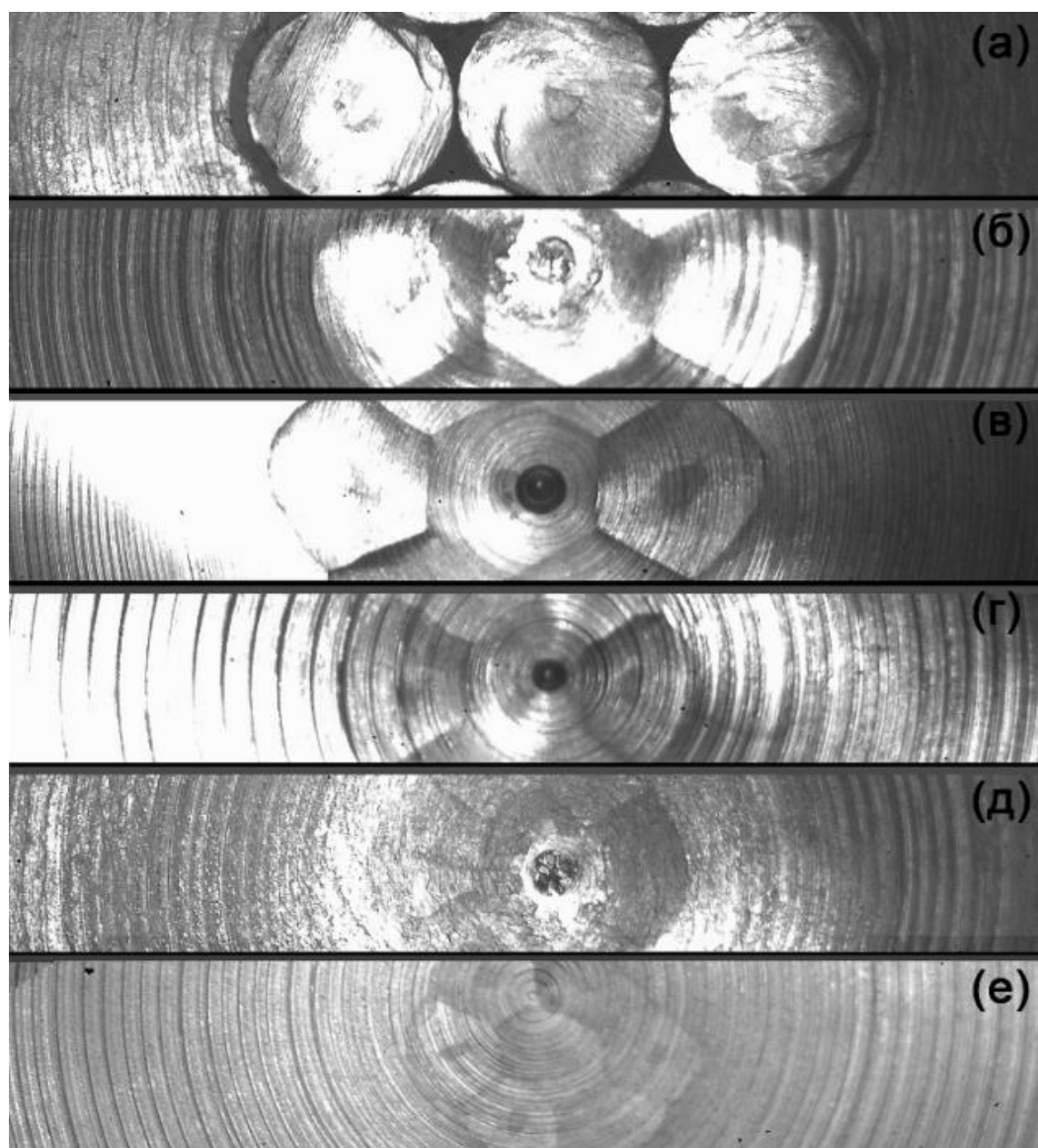


Рис.4.15. Фотографии сечений преформы, полученной на 5-м этапе алгоритма экструзии. Отсчет от пресс-остатка внутри контейнера (е), фотографиям соответствуют отметки длины в 31,5 мм (а), 27,5 мм (б), 24,5 мм (в), 13,6 мм (г), 11,6 мм (д). Габариты – см. рис. 4.17



Несмотря на их нелинейность после каждого этапа, на последнем этапе удалось выделить достаточную длину (в системе отсчета MIR волокон) в 1,5 м., однородность диаметра вставок для которой была не больше цены деления измерителя, встроенного в микроскоп, – 1 мкм (рис. 4.17, д). Этого удалось достичь благодаря тому, что при помещении заготовки в контейнер для прямой экструзии мы располагали ее узкой частью (вершиной усеченного конуса) к фильере. Таким образом, последствия конуса экструзии каждого этапа нивелировались на следующем этапе этим же, но встречным конусом экструзии. Встреча двух конусов, в частности, обусловила достижение расчетных габаритов шага и диаметра вставок вблизи 1,0 – 1,5 м на графиках (б) и (д). Она же объясняет локальный минимум вблизи 2,5 – 3,0 м на тех же графиках – это впадина между направляющими двух конусов, обращенных друг к другу вершинами.

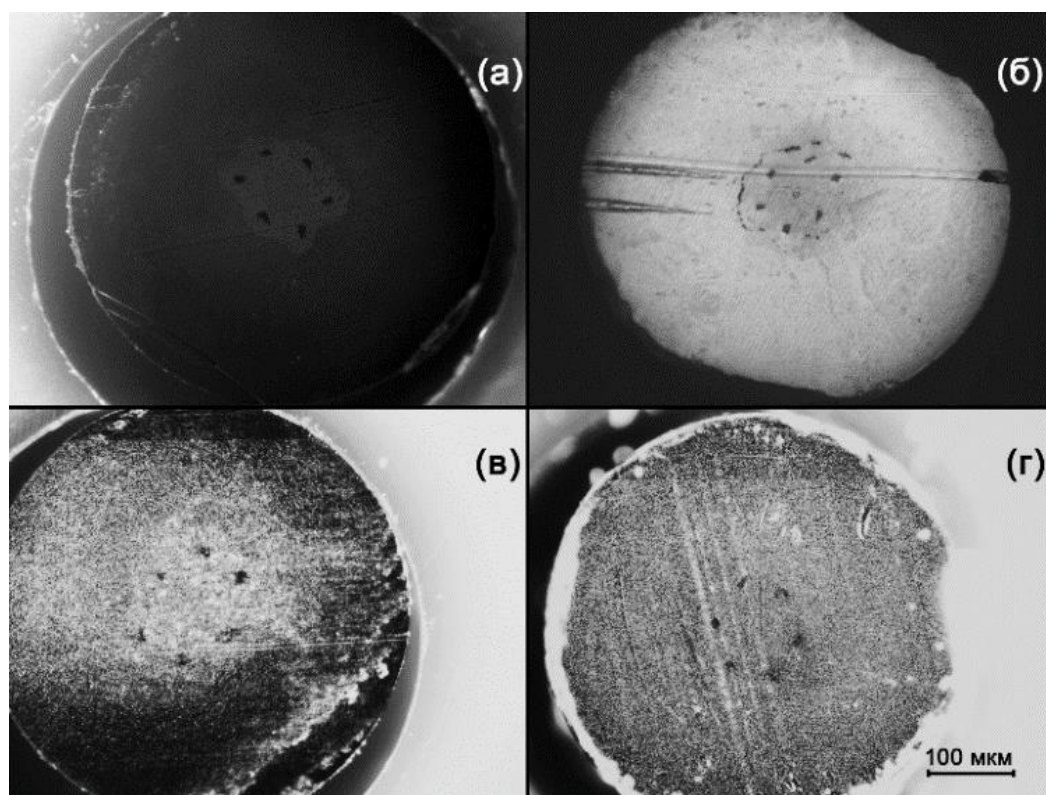


Рис. 4.16. Фотографии торцов волокон, полученных экструзией разных участков одной преформы на этапе 6: (а), (б) – преформы с более постоянной по длине микроструктурой (расстояние между (а) и (б) – 100 мм), (в), (г) – с менее постоянной микроструктурой (между (в) и (г) – 115 мм). Центральная вставка видна не во всех случаях, так как видимый диапазон съемки микроскопа не всегда способен разрешить настолько маленькую разность показателей преломления (2 мол. % в пересчете на мол. долю) ИК-материалов.

Габариты – см. рис. 4.17

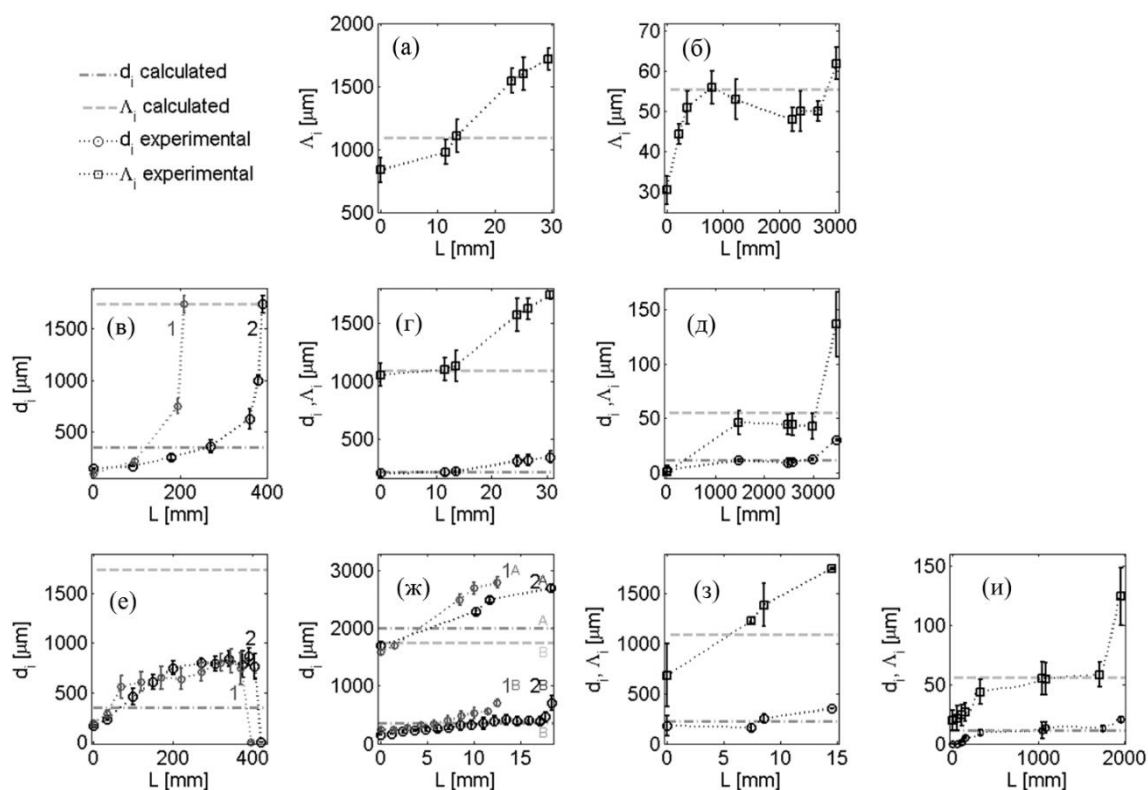


Рис. 4.17. Варьирование шага ( $\Lambda_i$ ) и диаметра ( $d_i$ ) элементов сборки по длине волокна; выше – для пробного образца  $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$ , ниже – для искомого мультисоставного: (а) – шаг перетянутой преформы (расчетное значение  $\Lambda_i^t = 1.09$  мм); (б) – шаг микроструктуры ( $\Lambda_i^t = 55.5$  мкм); (в) – диаметр стержней-штабиков для преформы ( $d_i^t = 350$  мкм, левая верхняя кривая – штабик для будущей центральной вставки, правая нижняя – для периферических вставок); (г) – диаметр и шаг перетянутой преформы ( $\Lambda_i^t = 1,09$  мм,  $d_i^t = 220$  мкм); (д) – диаметр вставок и шаг искомого волокна ( $\Lambda_i^t = 55,5$  мкм,  $d_i^t = 11,1$  мкм); (е) – диаметр запертых конических вставок после перетяжки; (ж) – диаметр вставок после двух (А и Б) этапов встречной экструзии простой преформы; (з) – диаметр вставок и шаг после однократной экструзии сложной преформы с предварительным получением простой преформы сверлением (алгоритм 5), (и) – соответствующее волокно.

#### 4.3.2. Нивелирование конусности экструзии и доработка алгоритма

Для выдерживания большей продольной однородности представляет интерес предотвратить варьирование диаметра штабика простой преформы на этапе 4. Если на графиках на рис. 4.17, выделить относительно линейный участок поликристалла для штабика (примем 70 % длины), то в пересчете на габариты самой заготовки угол при вершине конуса, в виде которого нужно изготовить штабик для нивелирования

конусности на этом этапе, составляет 50–55°. Это означает, что диаметр штабика должен изменяться от 2,5 до 7,9 мм при рабочей длине заготовки 5,67 мм.

В связи с этим алгоритм экструзии снова должен быть пересмотрен:

- 1 этап – перетягивание поликристалла состава  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$  с диаметра 16 в 14 мм с последующим высверливанием конуса вышеприведенных габаритов. Этап повторяется дважды для двух видов ответных конических вставок. Коэффициент перетяжки при экструзии – 1,14, как и в предыдущем алгоритме;

- 2 этап – перетягивание поликристаллов  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  и  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$  для будущих вставок с 16 до 8 мм с последующим вытягиванием конуса, чьи габариты описаны выше. Коэффициент перетяжки – 2,0;

- 3 этап – выдавливание гексагональной призмы, как и в предыдущем алгоритме. Максимальное измерение сечения призмы – 5,5 мм. На этот раз состав трубки –  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ , так как мы считаем, что больший градиент показателя преломления между центром и периферией поспособствует концентрированию фундаментальной моды на продольной оси будущего волокна, за счет механизма ПВО;

- 4 этап – преформа «штабик в трубке» («rod-in-tube»), части которой подготавливались на этапах 1 и 2, перетягивается с коэффициентом 4,0 до двухслойного волокна с диаметрами сердцевины и оболочки 1,75 и 0,35 мм соответственно. Подразумевается, что конусовидная форма элементов преформы поможет выдержать однородность сердцевины по длине волокна, нивелируя вносимую экструзией конусность;

- 5 и 6 этапы – аналогичны этим же этапам предыдущего алгоритма и связаны с получением волокна из преформы, трубка для которой подготавливается на третьем этапе, а штабик является поленицей из семи фрагментов двухслойного волокна с сердцевиной двух составов –  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  для периферических вставок и  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$  для центрального дефекта. Коэффициенты перетяжки – 1,6 и 20,0 соответственно.

Однако уже на четвертом этапе данный алгоритм показал ряд недостатков: непостоянство геометрии сердцевины по длине волны как по среднему размеру, так и по симметрии; необходимость более точного

предварительного расчета объема вставочного материала; наличие остаточной конусности, хоть и резко обрывающейся у выходного торца волокна (из-за запертости вставки с этого конца преформы, рис. 4.17, е). В связи с этим было решено вернуться к цилиндрической форме вставок и заменить этап 4 двумя актами встречной экструзии, как на этапах 5 и 6 (рис. 4.17, ж). Однако, несмотря на более плавное и прямое увеличение диаметра сердцевины волокон, отклонение от теоретического диаметра осталось значительным. В результате в конечном алгоритме мы отказались от вытягивания двухслойного волокна: сначала были получены однослойные волокна с диаметрами 1,75 и 0,35 мм, после чего они были разрезаны, и отрезки первого диаметра были рассверлены под диаметр 0,35 мм, чтобы создать набор маленьких преформ-вставок для этапа 5. Семь преформ с двумя составами стержней были помещены в призматический канал заготовки, полученной на этапе 3, после чего составная мультикомпонентная преформа была передавлена с 16 мм до 10 мм (рис. 4.17, з) и далее до волокна 0,5 мм (рис. 4.17, и). Соответствующая схема получения ФКС с указанием актов экструзии, в том числе с индикацией встречной экструзии, приведена на рис. 4.18. Режимы получения всех элементов будущей микроструктуры для алгоритмов с конусной вставкой простой преформы, с цилиндрической вставкой, экструдированной дважды, и с двухслойными заготовками, полученными механически, представлены на рис. 4.19. На нем скачки скорости экструзии в самом начале обусловлены тем, что отсчет времени не всегда производился с момента контакта пресса и оснастки. Скачки давления в середине экструзии, как на рис. 4.19, а, ж, либо выход на плавное возрастание, как на рис. 4.19, в, г, говорят о начале прессования кристалла после выпрессовывания защитной фторопластовой заготовки, перекрывающей подачу воздуха в нижнюю часть оснастки. Выход давления на плато характерен для перетягивания в малый диаметр (рис. 4.19, д, е, з, и). Режимы получения волокон с диаметром 0,35 мм нестабильны, как видно по рис. 4.19, о, 4.19, п и требуют дальнейшей отработки. Но тем не менее световоды необходимой длины все равно были получены. Этапам с использованием сверления соответствуют рис. 4.19, р (преформа) и рис. 4.19, с (финальное волокно). На последнем рисунке приведена вставка с увеличенной микроструктурой (все детали разрешены при искусственном белом свете). Волокно отличается низким разбросом

Вок шаг гео-

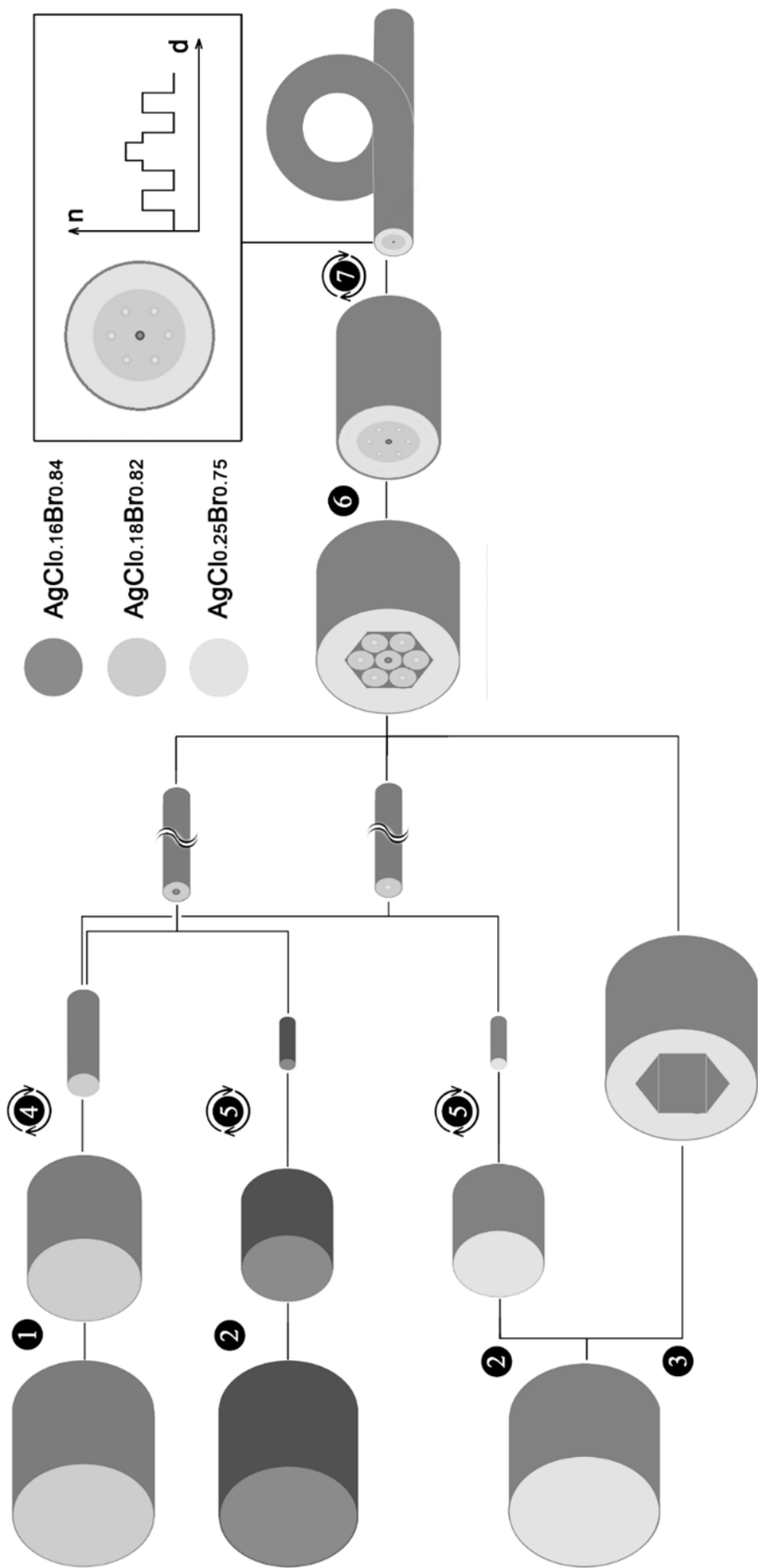


Рис. 4.18. Схематическая диаграмма последовательных этапов формирования микроструктуры (не в масштабе). На вставке

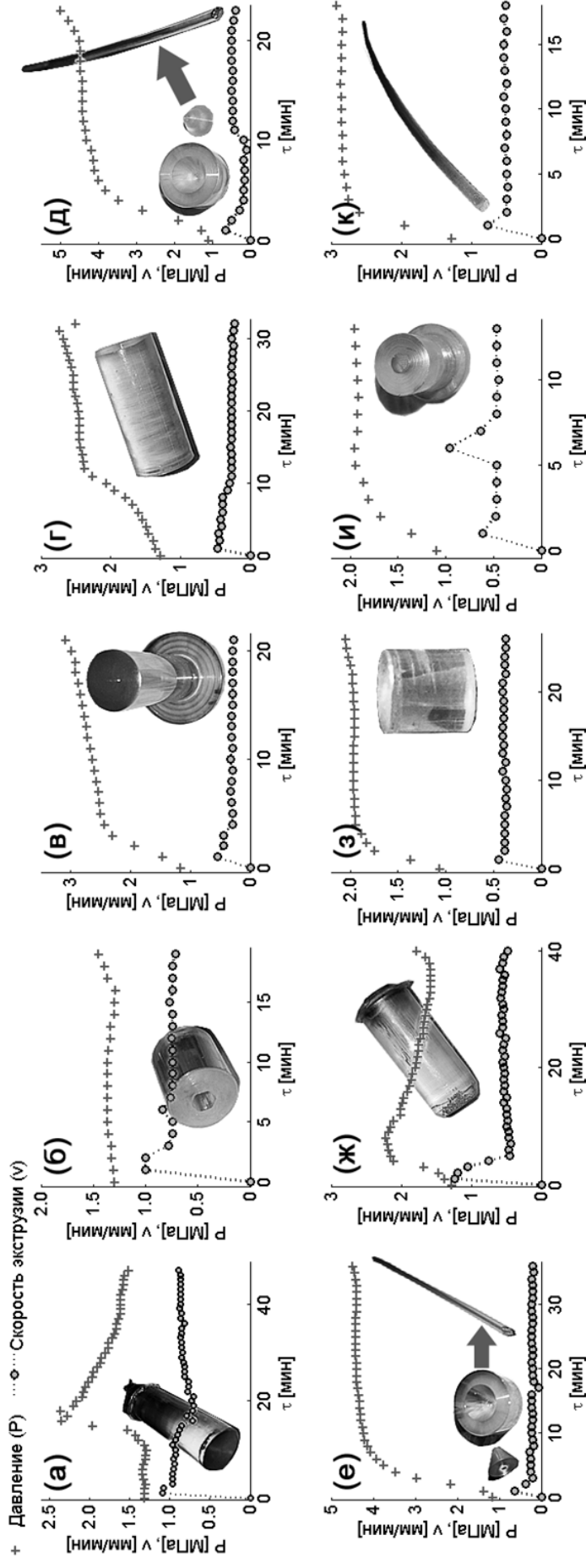


Рис. 4.19. Режимы экструзии на разных этапах получения микроструктурированного волокна:

(а), (в), (г), (д), (е) – этапы 1 – 3 алгоритма с конусными вставками первой преформы, (ж) – алгоритм с попеременной встречной экструзией по алгоритму с цилиндрическими вставками первой преформы, остальные – с заменой экструзии преформы ее сверлением: (а) и (ж) – передавливание из 16 мм в 14 мм ( $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$ ); (б) – получение гексагональной трубки, не использованной в алгоритме с коническими вставками; (в) и (г) – из 16 мм в 8 мм ( $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  и  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$  в  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$ , соответственно); (д) и (е) – из 14 мм в 1,75 мм (те же составы); (з) и (и) – из 14 мм в 10 мм (те же составы); (к) и (л) – из 10 мм в 1,75 мм (те же составы);

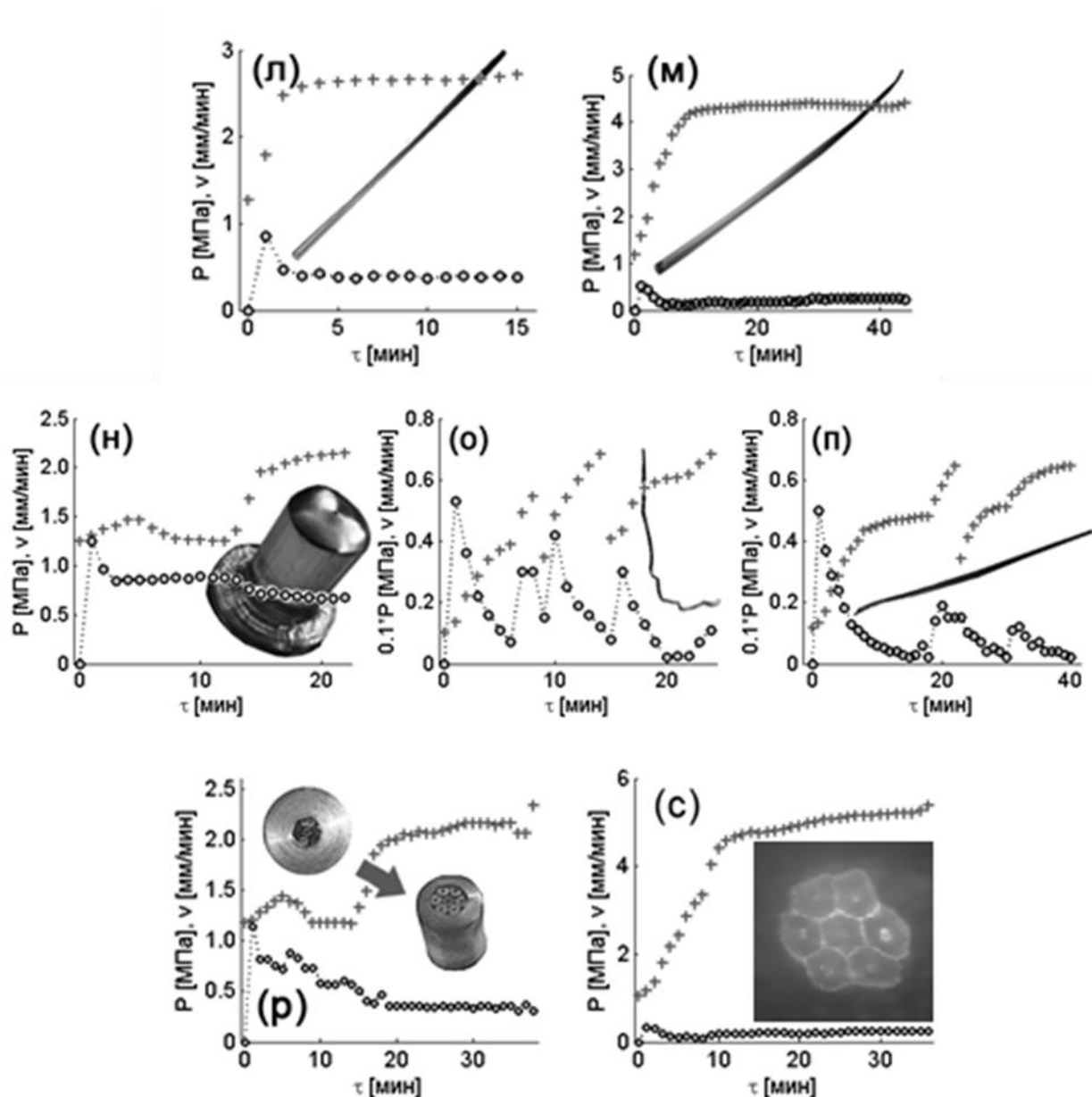


Рис.4.19.Продолжение (м) – из 14 мм в 1,75 мм для  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$ ; (н) – из 16 в 10 для  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$ ; (о) и (п) – из 10 в 0,35 для  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  и  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$  соответственно; (р) – передавливание составной мультикомпонентной преформы из 16 мм в 10 мм; (с) – получение волокна 0,5 мм из сложной преформы 10 мм

#### Выводы по главе 4

В главе 4 приведены методы экструзии микроструктурированных волокон «stack-and-draw» и комбинированный подход по принципу методик «stack-and-draw» и «rod-in-tube». Для сравнения данных методик и оценки их применимости для изготовления инфракрасных ФКС

на основе кристаллов галогенидов серебра в главе представлены результаты экспериментов по производству волокон на основе приведенных выше подходов.

На основании верификации была выбрана вторая методика как наиболее подходящая для изготовления микроструктурированных инфракрасных световодов.

Приведено подробное описание каждого этапа экструзии и общая схема изготовления ФКС. Дополнительно в главе 4 показаны режимы экструзии монокристаллических заготовок и входные параметры для начальных кристаллов, заготовок и преформ. Построены и отработаны зависимости давления, скорости от времени для каждого из семи этапов экструзии, что обеспечивает равномерное распределение структурных элементов фотонно-кристаллических световодов по длине. Представлены детали оснастки для проведения каждого этапа экструзии.

Представлен пример изготовления микроструктурированного волокна с увеличенным диаметром поля моды до 100 мкм на длине волны 10,6 мкм с помощью семистадийного алгоритма процесса экструзии.

### *Задачи*

1. Рассчитайте длину световода исходя из размеров заготовки. Высота заготовки –  $H$ , диаметр –  $D$ . При экструзии световодов диаметр полученного волокна равен диаметру  $d_f$  фильеры. Значения необходимых для расчета параметров приведены в таблице.
2. Определите давление  $P$  в экструзионном контейнере, если известны усилия  $T$  для фильер различных размеров. Прилагаемые усилия и геометрические параметры заготовки и фильеры приведены в таблице.

Данные для решения задач 1 и 2

№ варианта	$d_f$ , мм	$H$ , мм	$D$ , мм	$T$ , т
1	0,1	4	3	1
2	0,3	6	8	3
3	0,5	10	10	5
4	0,9	12	14	8
5	1,1	20	16	10
6	1,7	25	20	12



Окончание таблицы

№ варианта	$d_f$ , мм	H, мм	D, мм	T, т
7	0,9	14	12	8
8	0,5	8	10	5
9	0,3	8	6	3
10	0,1	6	4	1

### *Библиографический список*

1. Infrared fibers / G. Tao [et al.] // Adv. in Opt. and Photon. — 2015. — Vol. 7. — P. 379-458.
2. Жукова, Л. В. Новые инфракрасные материалы: кристаллы и световоды : монография / Л. В. Жукова, А. С. Корсаков, Д. С. Врублевский. — Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2014. — 280 с.
3. Кацуяма, Т. Инфракрасные волоконные световоды / Т. Кацуяма, Х. Мацумура. — Москва : Мир, 1992. — 272 с.
4. Жукова, Л. В. Инфракрасные кристаллы. Теория и практика : учебник / Л. В. Жукова, А. С. Корсаков, Д. Д Салимгареев. — Екатеринбург : УМЦ УПИ, 2015. — 215 с.
5. Rave, E. Ordered bundles of infrared-transmitting AgClBr fibers: optical characterization of individual fibers / E. Rave, L. Nagli, A. Katzir // Opt. Lett. — 2000. — Vol. 25, № 17. — P. 1237-1239.
6. Волоконные световоды для среднего инфракрасного диапазона : учебник / Л. В. Жукова, А. С. Корсаков, А. Е. Львов, Д. Д Салимгареев. — Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2016. — 247 с.
7. Silver halide photonic crystal fibers for the middle infrared / E. Rave [et al.] // Appl. Opt. — 2004. — Vol. 43, № 11. — P. 2236-2241.

### ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИК-СВЕТОВОДОВ

Представленные в данной главе методы по определению функциональных свойств оптических материалов следует разделить на комплекс существующих базовых методов исследований и новые методики по определению физических свойств кристаллов и световодов на основе систем  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ ,  $\text{AgBr} - \text{AgI}$ ,  $\text{AgBr} - \text{TlI}$ ,  $\text{AgBr} - (\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54})$ .

#### 5.1. Определение примесей, химического состава и структуры кристаллов

##### 5.1.1. Рентгенофлуоресцентный метод

Химический состав шихты для выращивания кристаллов и самих кристаллов на основе твёрдых растворов  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ ,  $\text{AgBr} - \text{AgI}$ ,  $\text{AgBr} - \text{TlI}$ ,  $\text{AgBr} - (\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54})$  определяется рентгенофлуоресцентным методом, основанным на возбуждении, измерении и сравнении интенсивности рентгеновского флуоресцентного излучения аналитических линий брома, йода, хлора в производственных пробах и образцах сравнения.

Аналитические линии для йода –  $\text{IK}\alpha$ , угол поворота гониометра  $12,26^\circ$ ; для хлора –  $\text{ClK}\alpha$ , угол поворота гониометра  $64,95^\circ$ ; для брома –  $\text{BrK}\alpha$ , угол поворота гониометра  $29,89^\circ$ . Спектрометр рентгеновский флуоресцентный VRA-20L с рентгеновской трубкой FSW-60/50, относительная погрешность 1 – 3%. Кристалл-анализатор для брома и йода –  $\text{LiF}$ , для хлора –  $\text{EDTT}$ .

Расчёт содержания компонентов проводится по уравнениям регрессии второго порядка. Коэффициент уравнения регрессии находился методом наименьших квадратов, с использованием теоретических интенсивностей, рассчитанных для эталонов с известным содержанием по программе флуоресценции. Содержание  $\text{Ag}$  и  $\text{Tl}$  в материалах определяется с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-7000 (Shimadzu). Разрешение составляет 125 эВ на линии 5,89 кэВ, кремниевые детекторы дрейфового типа с термоэлектрическим охлаждением (SDD), рентгеновская трубка Анод Rh напряжение 4–50 кВ, ток 1–1000 мкА, диапазон измерений от 11Na

до  $^{92}\text{U}$  (EDX-7000). Количественный анализ проводится методом калибровочных кривых с использованием матричной коррекции.

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) относят к категории элементных анализов. Метод характеризуют высокая экспрессность и относительно простая пробоподготовка, высокая помехоустойчивость, отсутствие ограничений по физическим свойствам и химическому составу объекта исследования. Метод также отличает неdestructивность, т. е. в процессе анализа с образцом не происходит никаких химических изменений. Граница обнаружения зависит от атомного номера элемента, например, для фосфора граница обнаружения составляет 0,01 %, для элементов начала пятого периода оценивается в 0,0002 %. В общем случае, в область определяемых входят элементы от Be до U включительно. Метод РФА основан на сборе и последующем анализе спектра, полученного путём воздействия на исследуемый материал рентгеновским излучением. По энергии и количеству квантов, излучаемых электронами атомов, возбужденными рентгеновским излучением, судят о строении вещества.

### ***5.1.2. Атомно-эмиссионная спектроскопия***

Примеси в кристаллах, а также химический состав новых кристаллов определяются также методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Для анализа кристаллов галогенидов серебра и таллия наилучшим образом подходит использование метода с индуктивно-связанной плазмой в качестве источника возбуждения. Индуктивно-связанная плазма (ИСП) – это тип газового разряда, возбуждаемого переменным магнитным полем при помощи индукционной катушки (индуктора). Определение состава кристаллов проводили на ИСП-спектрометре CIROS<sup>CCD</sup> производства фирмы SPECTRO. Для анализа используются синтетические образцы сравнения с введением матрицы, на основании которых строились калибровочные кривые. Относительная погрешность составляет 3% по основному веществу и 10 – 15 % по примесям. Содержание катионных примесей в кристаллах галогенидов металлов после синтеза и очистки методом ТЗКС составляло: Fe, Si, Pb, Sn, Zn, In – менее  $1,0 \cdot 10^{-5}$  мас. %, а Mg, Al, Ni, Cr, Mn – менее  $1,0 \cdot 10^{-6}$  мас. %. Чувствительность метода –  $10^{-5}$  –  $10^{-6}$  мас. %.

### **5.1.3. Дифференциально-термический анализ диаграммы фазового состояния систем**

Методом дифференциально-термического анализа (ДТА) изучаются диаграммы систем  $\text{AgBr} - \text{TlI}$  и  $\text{AgBr} - (\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54})$ .

ДТА – метод исследования физических и химических превращений, сопровождающихся выделением или поглощением тепла. Сущность метода заключается в измерении разностей температур между исследуемым и эталонным образцами при их одновременном и идентичном нагреве или охлаждении (дифференциальной температуры).

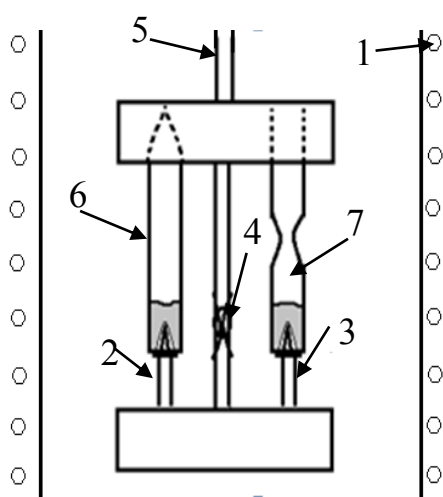
Анализ образцов проводится с использованием дериватографа Q-1500D при нагреве до температуры 480–490 °С со скоростью 5 °С/мин и охлаждении 2–3 °С/мин. В качестве эталонного образца рекомендуется использовать стабилизированный оксид алюминия, запаянный в стеклянную ампулу, с близкими к исследуемому веществу значениями теплоемкости и теплопроводности, который в исследуемом диапазоне температур не испытывает никаких структурных и фазовых изменений. Таким образом, возникающая при одновременном нагреве или охлаждении исследуемого и эталонного образцов разность температур между ними обуславливается эндо- или экзотермическими превращениями или реакциями в исследуемом образце.

Исходные компоненты высокой степени чистоты необходимо предварительно смешивать и запаивать в ампулы из стекла. Содержание катионных примесей в образцах на основе систем  $\text{AgBr} - \text{TlI}$  и  $\text{AgBr} - (\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54})$  по данным химико-спектрального метода анализа составляет: Mg, Al, Ni, Cr, Mn – менее  $1,0 \cdot 10^{-6}$  мас. %, а Fe, Si, Pb, Sn, Zn, In – менее  $1,0 \cdot 10^{-5}$  мас. %. Гомогенизация образцов проводится в течение 20 ч при температуре 500 °С в расплавленном состоянии, затем их необходимо медленно охладить. В установке применяются калиброванные платино-платинородиевые термопары.

В данном учебнике представлен блок ДТА, разработанный сотрудниками ИВЦ «ЦИВТ» УрФУ к собственной ростовой установке ПКБ-01 (печь конструкции Бриджмена) (рис. 5.1). Правомочность использования данного блока для дифференциально-термического анализа находится в соответствии с ГОСТ 21553-76. В данной установке применяются хромель-алюмелевые термопары ТХА 0292 – 02т с изоляцией из стеклоткани. Регулирование нагрева осуществляется с помощью многоканального программируемого терморегулятора ТРМ

148 (ОВЕН), подключенного к компьютеру. В качестве эталонного образца использовали стабилизированный оксид алюминия, запаянный в ампулу из стекла «пирекс». Скорость нагрева и охлаждения задается 5 °С/мин. В диапазоне температур от 50 до 500 °С блок ДТА был откалиброван по реперным веществам:  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{Zn}$ . Точность определения температуры фазовых превращений составляет  $\pm 0,2$  °С по температуре начала пика на кривой ДТА.

Термические методы анализа, к числу которых относится ДТА, являются одними из основных при исследовании процессов в конденсированных системах. Экспериментальные кривые ДТА используются для получения первичной информации о температурном интервале взаимодействия веществ, а также фазовых превращений в исходных и в образующихся веществах.



(а)



(б)

Рис. 5.1 – Схема (а) и общий вид (б) блока ДТА для печи ПКБ-01: 1 – корпус печи; 2, 3, 4 – термопары; 5 – штук; 6 – ампула с эталоном; 7 – ампула с исследуемым веществом

#### ***5.1.4. Рентгеноструктурный анализ твёрдых растворов галогенидов серебра и таллия (I)***

Для подтверждения образования твёрдых растворов галогенидов серебра как в твёрдых растворах, полученных методом ТЗКС, так и в выращенных кристаллах используется рентгеноструктурный анализ. Так, для индивидуальных галогенидов металлов и их твёрдых растворов были получены дифрактограммы с использованием дифрактометров Rigaku MiniFlex 600 и ДРОН-3 с медным анодом, излучение  $\text{Cu-K}\alpha$ . Съёмка велась при комнатной температуре в интервале

$2\theta = 20^\circ - 80^\circ$  с шагом  $0,01^\circ$  и временем накопления сигнала в точке 1 с. для ДРОН-3 и в углах  $3 - 90^\circ$ , с шагом  $0,02^\circ$  и скоростью сканирования  $10^\circ/\text{мин}$  для Rigaku MiniFlex 600. Фазовый состав образцов определяли с привлечением картотеки дифрактометрических данных JCPDS-ICSD. Расчёт межплоскостных расстояний рассчитывали, основываясь на уравнении Вульфа-Брега [1]. Параметр элементарной ячейки определяли по рефлексу с индексом 420.

Так как не существует стандартной методики съёмки дифрактограмм с поликристаллических образцов, авторами и сотрудниками ИВЦ «ЦИВТ» была разработана собственная методика для поликристаллических образцов кристаллов твёрдых растворов галогенидов металлов. Поликристаллические образцы в виде пластин предварительно изготавливаются методом горячего прессования из монокристаллов либо из поликристаллических образцов после ДТА.

#### ***5.1.5. Сканирующая электронная микроскопия***

СЭМ изображения световодов и поликристаллических пластин получают с помощью растровых электронных микроскопов. Электронный микроскоп FEI CM 30 с регистрацией вторичных электронов позволяет получать изображения различных объектов с увеличением до 100 000 крат.

Электронный растровый микроскоп Zeiss SIGMA VP обладает эффективным увеличением проводящих образцов до одного миллиона раз с разрешением до 1,3 нм. Система позволяет проводить работы с непроводящими непокрытыми образцами, включая влагосодержащие, в режимах низкого вакуума или локальной компенсации заряда. Энергодисперсионный спектрометр Oxford позволяет проводить элементный анализ наноструктур (диапазон детектирования – от Be до Pu, диапазон количественного анализа – от B до U).

#### ***5.1.6. Оптическая микроскопия***

Оптические микрофотографии световодов и поликристаллических пластин получают с использованием следующих оптических микроскопов.

Микроскоп Olimpus BX 51 (Япония). Прямой исследовательский микроскоп проходящего света с галогеновым осветителем 12В, 100Вт,

тринокуляр, левосторонними ручками препаратоводителя, окулярным микрометром (перекрестье). Вариант для светлого поля, пятигнездная револьверная головка, конденсор Аббе с NA до 0,9, окуляры 10х / 22, объективы PlanAchromat 4х, 10х, 40х, 100хМИЛОМО X 80.

Микровизоры  $\mu$ Vizo-MET-221 (ООО «ЛОМО», Россия). Представляют собой новое поколение микроскопов с оптико-цифровым каналом наблюдения для регистрации и обработки микроизображений. Предназначен для исследования микроструктуры металлов, сплавов, ИК-кристаллов, ИК-световодов и других непрозрачных объектов. Увеличение оптическое 1000х, программное 3000х.

## **5.2. Оптические свойства нанокристаллических ИК-световодов**

### ***5.2.1. Определение спектрального диапазона пропускания ИК-кристаллов***

Спектральные характеристики монокристаллов и поликристаллических пластин на основе твёрдых растворов AgCl – AgBr, AgBr – AgI, AgBr – TlI, AgBr – (TlBr<sub>0,46</sub>I<sub>0,54</sub>) снимаются с использованием следующих приборов:

- инфракрасный Фурье спектрометр Vertex 80 (Bruker) в комплекте: спектральный диапазон дальнего ИК 680–165 см<sup>-1</sup>; интерферометр UltraScan; многослойный светоделитель для дальнего ИК из майлара; источник дальнего ИК – глобар; детектор для дальнего ИК – DLaTGS; разрешение 4 см<sup>-1</sup>; количество сканирований фона и образцов – 32 скана;
- MIR – часть от 1,38 до 41,6 мкм снята на спектрофотометре Shimadzu IRPrestige-21 (принцип работы FTIR – Fourier transform infrared spectroscopy) с делителем луча CsI (ограничивает до 41,6 мкм), детектором DLaTGS (дейтерированный триглицинсульфат, легированный L-аланином) и двадцатикратным сканированием с разрешением 0,5–16,0 см<sup>-1</sup>. Спектрометр также имеет делитель KBr, диапазон работы 1,28–28,5 мкм, охлаждаемый жидким азотом MCT детектор (диапазон работы 1,28 – 16,00 мкм);
- UV-NIR – спектры всех образцов были сняты с помощью спектрофотометра (Shimadzu UV-1800). Диапазон съёмки 190–1100 нм. Спектральное разрешение – от 2 до 0,05 нм.

## 5.2.2. Определение дисперсии показателя преломления

### 5.2.2.1. Подготовка образцов

Для проведения исследований, связанных с определением дисперсии показателя преломления, диапазона пропускания, фотостойкости, а также рентгеноструктурного анализа, необходимо подготовить поликристаллические пластины на основе твёрдых растворов  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ ,  $\text{AgBr} - \text{AgI}$ ,  $\text{AgBr} - \text{TlI}$ ,  $\text{AgBr} - (\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54})$ . Кристаллы данных систем были выращены вертикальным методом Бриджмена на установке ПКБ-01, а материал для них был получен методикой термоzonной кристаллизации-синтеза, предусматривающей концентрацию примесей не более  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  мас. % [2].

Рассмотрим алгоритм получения поликристаллических образцов. Из конической части монокристаллов вырезаются цилиндрические заготовки (токарный станок Proxxon PD 400, титановый резец, 560 об/мин) габаритами  $\varnothing 7,5 \times 1,5$  мм, которые далее подвергаются горячему прессованию на ручном гидравлическом прессе Specac 15 Ton (рис. 5.2, а) до получения плоскопараллельных пластинок. Нагрузка на площадь образца  $\sim 44 \text{ мм}^2$  не должна превышать 5–6 т. Апробация режимов была произведена ранее [3] при прессовании линз из аналогичных материалов. При прессовании пластинок образцы зажимаются между полированными дисками из нержавеющей стали, а сама оснастка фиксируется в нагреваемых обкладках пресса; толщина образцов задается регулируемыми толщиной стальными кольцами, одно из которых изображено на рис. 5.2, б. Оснастка помещается в пресс до включения его, но после включения охлаждающей его воды. Через 15 мин после выхода на режим (конец плато на рис. 5.2, в) прикладывалась нагрузка в 6 т и поддерживалась в течение минуты, после чего прессу задавалось охлаждение до комнатной температуры. Само плато необходимо для того, чтобы пластинка успела прогреться: недостаточный прогрев приводит к растрескиванию при приложении нагрузки. Образцы извлекаются по достижении комнатной температуры. Номинальная температура составляет  $120^\circ\text{C}$ . Водяное охлаждение необходимо отключить после извлечения оснастки.



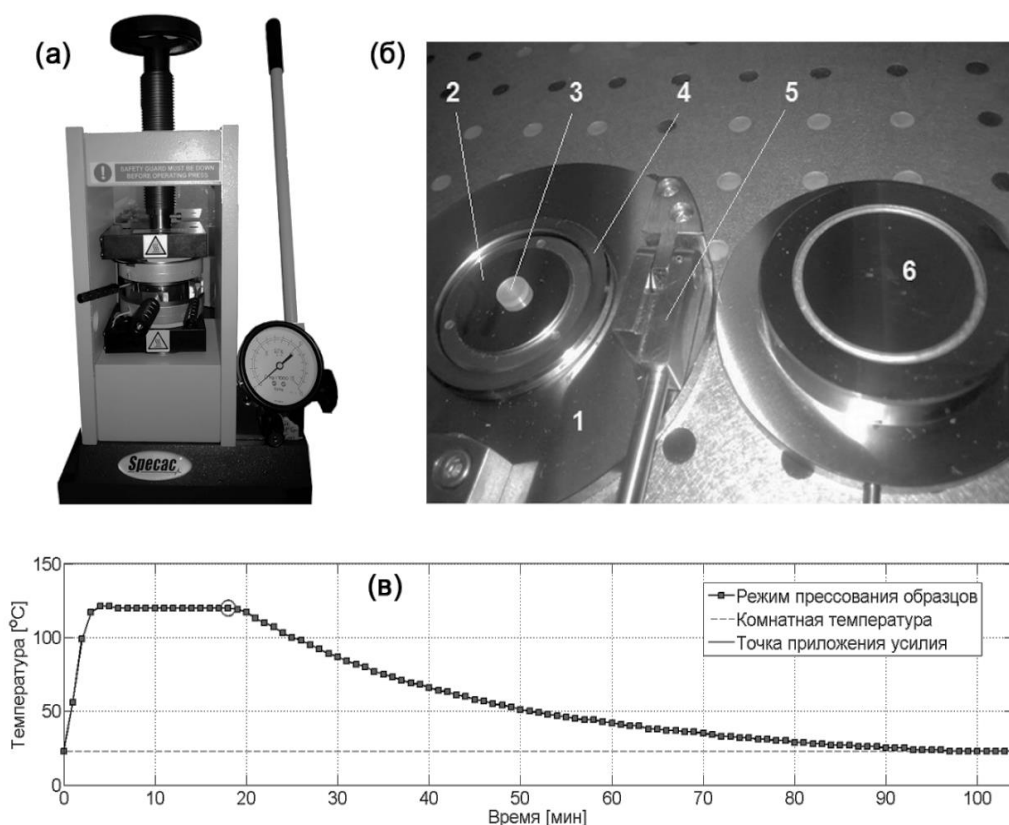


Рис. 5.2. Оборудование для прессования образцов:

- (а) – ручной гидравлический пресс SPECAC 15 Ton с оснасткой,  
 фронтальный вид; (б) – оснастка с заготовкой: 1 – нижняя обкладка;  
 2 – площадка, регламентирующая максимальный диаметр заготовки;  
 3 – заготовка; 4 – сменное кольцо, регулирующее толщину пластинки;  
 5 – рычаг для вскрытия оснастки; 6 – верхняя обкладка;  
 (в) – температурный режим прессования заготовок

Толщина  $d$  измерялась гладким механическим микрометром МК 25-2 (цена деления – 1 мкм) как в центре пластинки, т. е. в месте просвечивания образца лазерным пучком при определении показателя преломления, так и по периметру для контроля плоскопараллельности (рис. 5.3).

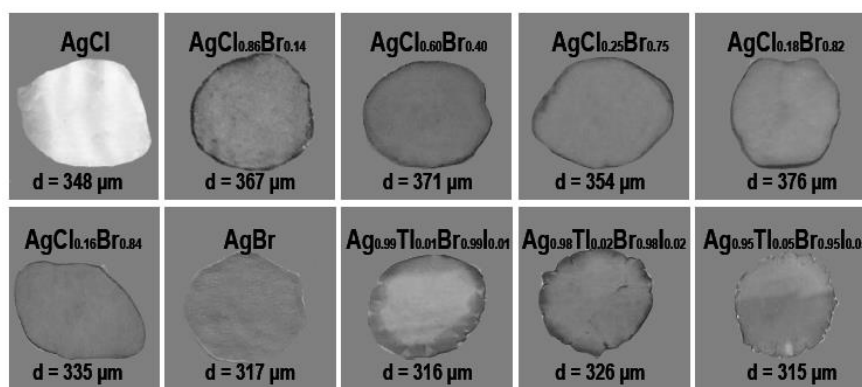


Рис. 5.3. Внешний вид используемых образцов с указанием толщины в месте дальнейшего просвечивания на FTIR

#### 5.2.2.2. Схема Майкельсона для He-Ne – лазера

Являясь обратной задачей в каноничном опыте Майкельсона, методика определения показателя преломления материала по длине волны используемого источника излучения является лабораторным приемом, точность которого определяется строгостью подсчета колец интерференционной картины. В основе метода лежит математическая связь самого показателя преломления образца, толщины образца, длины волны используемого лазера и интерференционного порядка. Последний – количество совмещений интерференционной картины с собой же при повороте пластинки-образца на угол, соответствующий кратности оптического пути рабочей длине волны лазера [4]. Этот метод используется как основной прием для измерения показателя преломления на длине волны красного гелий-неонового лазера ( $\lambda = 632,8$  нм). Рассмотрим далее пример основных измерений показателя преломления на составах AgCl – AgBr и AgBr – TII.

##### *Описание схемы, ход лучей*

В основе метода определения показателя преломления лежит возникновение интерференции двух пучков света, прошедших разный путь из-за наличия измеряемого образца в одном из рукавов интерферометра. Наличие этого образца вносит разность оптического хода лучей, тогда как воздух, принимаемый за основную среду второго рукава, имеет близкий к единице показатель преломления и не влияет на оптический ход. Поворот образца приводит к попеременной смене картин усиливающей и ослабляющей интерференции, смена которых математически связана с показателем преломления исследуемого материала.

Принципиальная схема интерферометра Майкельсона приведена на рис. 5.4. Луч лазера 1 делится на два за счет делителя 7. Один из лучей проходит через последний, затем, достигая зеркала 5, отражается от него и от делителя и принимается экраном 8. Второй луч изначально отражается от делителя, проходит через образец 6, отражается от зеркала 4 и впоследствии достигает экрана. Видно, что отражение от делителя происходит под углом  $45^\circ$ , а от зеркала – под вдвое большим. Для увеличения результирующей интерференционной картины используются линзы в позициях 2 и 3. Из рис. 5.5 можно заметить, что при повороте образца на угол, соответствующий оптическому пути, не кратному длине волны лазера, картина отличается от изначальной, но

в дальнейшем превращается в себя. Количество подобных превращений  $m$  связано с углом поворота образца (углом падения луча на образец)  $\theta$  и показателем преломления  $n$  по следующей формуле [4]:

$$n = -\frac{b^2 + \sin^2 \theta}{2b}, \quad (5.1)$$

где  $b = \frac{m\lambda}{2d} - 1 + \cos \theta$ ,  $\lambda$  – рабочая длина волны лазера,  $d$  – толщина образца. Вывод формулы приведен в конце этого раздела.

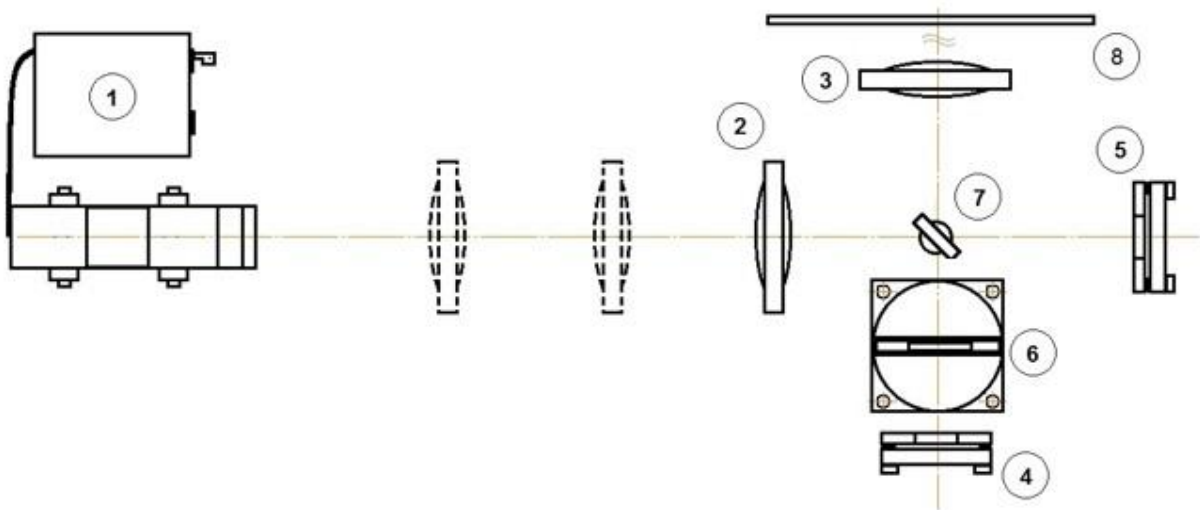


Рис. 5.4. Схема интерферометра Майкельсона с лазером: 1 – лазер, 2 и 3 – линзы, 4 и 5 – зеркала, 6 – держатель образца, 7 – делитель луча, 8 – экран

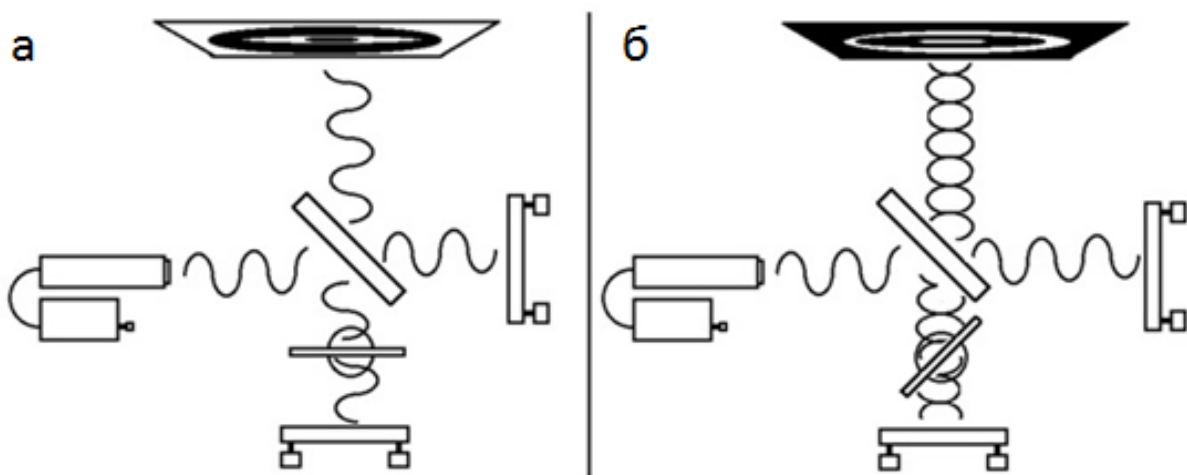


Рис. 5.5. Упрощенная демонстрация фазового сдвига лучей в случаях усиливающей (а) и ослабляющей (б) интерференции при повороте исследуемого образца

В установке в качестве зеркал и делителя использовались пластины кремния и поляризационное стекло соответственно. Зеркала были установлены в двухкоординатные держатели с возможно-

стью вращения последних в плоскости стола и наклона в перпендикулярной плоскости; продольная координата была фиксирована и в ходе опыта не изменялась, чтобы сохранить разность хода только за счет наличия образца в одном из рукавов. Делитель же был жестко зафиксирован под углом в  $45^\circ$  к проходящему лазерному пучку перпендикулярно плоскости стола. Источником излучения послужил He-Ne лазер (CVI MellesGriot 25-LHP-121-230) с рабочей длиной волны 632,8 нм. Образцы помещались в поворотный механизм, допускающий вращение на  $360^\circ$  с шагом  $1^\circ$ . Для предохранения от дневного света каждый образец, представляющий собой светочувствительный материал [3], был накрыт защитой с прорезями для прохождения лазерного пучка. Началу отсчета при измерении соответствовал тот момент, когда при повороте образца интерференционная картина на экране (рис. 5.6) временно становилась статичной, не изменяясь в пределах последующих двух градусов.

Для первого образца измерения проводились в диапазоне  $0^\circ$ – $18^\circ$  с шагом в  $2^\circ$ . Для него была проведена серия как минимум из десяти измерений. В целях удобства изменения интерференционной картины значение  $\Delta m$  регистрировалось для каждого рассматриваемого угла поворота независимо. При расчетах показателя преломления использовалось уже сквозное изменение интерференционного порядка  $m$  как суммы всех  $\Delta m$  по количеству измерений в серии. Целым значениям  $\Delta m$  соответствовало полное превращение интерференционной картины в себя, очевидно, при прокручивании образца на количество градусов, достаточное для прохождения светом расстояния, кратного его длине волны. Недостатком такого подхода является необходимость четкого определения  $\Delta m$  в малых углах при фиксированном значении  $\theta$ , что крайне неудобно вследствие влияния возможных вибраций, а также из-за небольших произвольных конформных деформаций и поступательных смещений самой картины интерференции в ходе опыта, что делает определение малых долей  $\Delta m$  трудоемкой задачей. Несмотря на то, что дальнейшая компьютерная обработка с итерацией  $n$  в малых углах все же позволяет получить достаточно точное значение показателя преломления при условии, что пластинка плоскопараллельна и прозрачна для рабочего излучения, использование такого подхода затруднено вышеописанными проблемами. Поэтому для остальных образцов был применен другой подход: фиксировалось уже  $\Delta m$  (разумеется, с некой погрешностью в малых углах, когда картина еще мало изменяется, как было сказано выше) и с шагом в десятки

$\Delta m$  – 20, 30, 40, 50 – было определено соответствующее значение  $\theta$ . Метод удобен тем, что вполне точно можно зафиксировать обе связанные величины –  $\theta$ , так как угол определяется с точностью до минуты, и  $\Delta m$ , кратное десяти. Десяти серий по четыре измерения в каждой оказалось вполне достаточно для определения  $n$ . Следует отметить, что оба подхода абсолютно равносильны с точки зрения именно расчета искомой величины, так как в любом случае для этого требуются пары чисел ( $\theta$ ,  $m$ ), являющиеся ключевыми данными в обоих подходах.

Вывод формулы (5.1) для расчета  $n$  целесообразно начать со схемы падения лазерного пучка на образец и прохождения сквозь него (рис. 5.7).

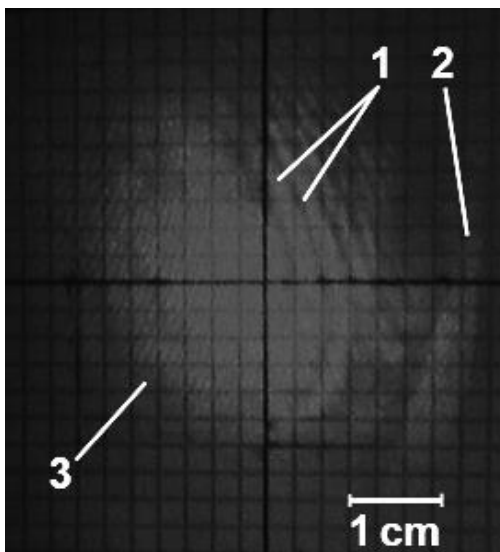


Рис. 5.6. Пример характерной интерференционной картины:  
1 – соседние полосы; 2 – паразитное пятно из-за отражения луча от задней стенки делителя; 3 – размытые полосы, вызванные непостоянством толщины образца

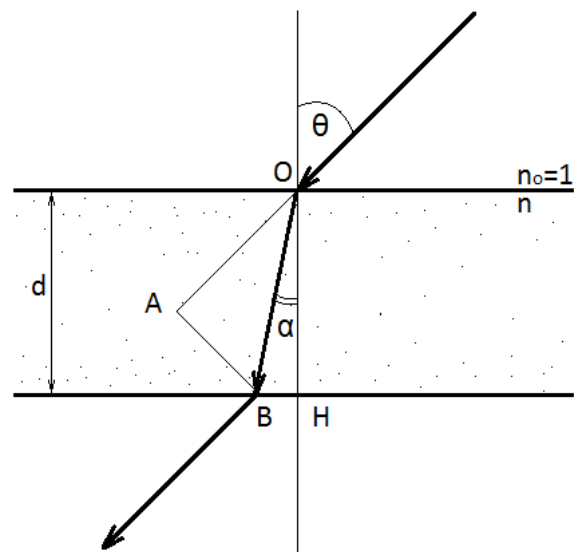


Рис. 5.7. К выводу уравнения (5.1) для расчета показателя преломления [4]

Автор [4] приводит следующую систему уравнений, основанную на известных законах геометрической оптики:

$$\begin{cases} \Delta = 2 \left( \frac{2\pi n d}{\lambda \cos \alpha} - \frac{2\pi d \cos(\theta - \alpha)}{\lambda \cos \alpha} \right) \\ \Delta_0 = 2 \left( \frac{2\pi n d}{\lambda} - \frac{2\pi d}{\lambda} \right) \end{cases}, \quad (5.2)$$

где первое уравнение отвечает разности фаз двух лучей, обусловленной самим наличием образца в одном из рукавов интерферометра, а второе – разности фаз в случае перпендикулярности плоскости образца

падающему лучу (углы падения и преломления равны нулю). Коэффициент перед круглой скобкой свидетельствует о том, что луч проходит через каждый из рукавов дважды. Каждое из выражений выводится из записи сдвига фазы. Для рукава с измеряемым образцом, имеющим толщину  $d$  и показатель преломления  $n$ , справедливо следующее: отраженный от зеркала луч падает на образец под углом  $\theta$  к нормали  $ОН$  (см. рис. 5.7); преломляясь в материале образца, луч идет вглубь под меньшим углом преломления  $\alpha$ , согласно закону Снеллиуса. Оптический путь  $ОВ$  луча в материале связан с толщиной образца через угол преломления, благодаря чему сдвиг по фазе будет выглядеть так:

$$\frac{2\pi n \overline{ОВ}}{\lambda} = \frac{2\pi n}{\lambda} \frac{d}{\cos \alpha}, \quad (5.3)$$

так как  $\overline{ОВ} = \frac{d}{\cos \alpha}$ . В воздухе же, т. е. во втором рукаве интерферометра, оптический путь луча  $ОА$  можно связать как с углом преломления луча в первом рукаве, так и с дополнительным к нему углом, равным разности угла падения и угла преломления.

$$\angle AOB = \theta - \alpha,$$

$$\overline{ОА} = \overline{ОВ} \cos(\theta - \alpha) \Rightarrow \overline{ОА} = \frac{d \cdot \cos(\theta - \alpha)}{\cos \alpha}. \quad (5.4)$$

Так как показатель преломления воздушной среды равен единице, сдвиг по фазе выражается так:

$$\frac{2\pi \overline{ОА}}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d \cos(\theta - \alpha)}{\cos \alpha}. \quad (5.5)$$

При повороте образца на угол  $\theta$  (см. рис. 5.5, б) изменение в разности фаз равно разности двух выражений в системе (5.2). Эта разность, по сути, кратна разности интерференционного порядка  $m$ , поэтому справедливо равенство  $\Delta - \Delta_0 = 2\pi m$ , что равносильно следующему уравнению для  $m$ :

$$m = \frac{2d}{\lambda} \left[ n \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) - \frac{\cos(\theta - \alpha)}{\cos \alpha} + 1 \right] \quad (5.6)$$

Автор [4] предлагает находить показатель преломления компьютерной итерацией, пока разница интерференционного порядка  $m$  и его выражения в уравнении (5.5) не станет минимальной. Однако можно выразить  $n$  напрямую, воспользовавшись формулировками косинуса разности и закона Снеллиуса для избавления от угла преломления  $\alpha$  в

уравнении. Используя сочетание последнего и основного тригонометрического тождества, можно преобразовать уравнение (5.5) таким образом:

$$\frac{m\lambda}{2d} - 1 = \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} - n - \cos \theta - \frac{\sin^2 \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}. \quad (5.7)$$

Проведя замену известных величин из соображений удобства, получим искомое уравнение (5.1), что достигается приведением оставшихся после замены слагаемых к общему знаменателю и избавлением от иррациональности в знаменателе.

В случае очень малых углов падения, когда величина синуса угла падения приблизительно равна величине самого угла падения, автор [4] предлагает использовать следующую формулу для быстрой приблизительной оценки показателя преломления  $n_{\text{appr}}$ :

$$n_{\text{appr}} = \frac{\theta^2}{\theta - \frac{m\lambda}{d}}. \quad (5.8)$$

#### *Погрешность методики*

Из формулы (5.1) видно, что конечное значение показателя преломления зависит от трех величин – порядка интерференционного максимума  $m$  (или просто порядка интерференции, который сводится к количеству возвращений интерференционной картины в себя), угла поворота образца  $\theta$  [°], равному углу падения луча лазера на образец, и толщины образца  $d$  [мкм]. Эти три величины являются источниками погрешности при определении  $n$ . Кажется рациональным представить абсолютную погрешность как полуразность значений  $n$ , определенных максимально неточно для каждого из трех источников ошибки; при этом относительная погрешность  $\gamma_n$  будет в  $n$  раз меньше. Соответствующие выражения для  $\gamma_n$ , выраженные из исходного уравнения (5.1), представлены в табл. 5.1.

В данной методике, очевидно, каждому углу поворота соответствует свое значение показателя преломления. Так как для каждого состава угол падения менялся в указанных выше пределах, можно говорить о серии измерений, что подразумевает четвертый источник погрешности вследствие серийности. В таблице он учтен за счет коэффициента вариации  $V$ , рассчитанного через среднее значение  $n$  в выборке ( $x_n$  с чертой), среднеквадратическое отклонение  $\sigma_n$  и  $t$ -критерий Стьюдента для  $i$  измерений в серии и принятой доверительной вероятности 0,95. Тогда суммарной погрешностью будет сумма

всех четырех погрешностей. В среднем для данных материалов и методик измерения она составляет 0,005 и не зависит явным образом от конкретного химического состава. Здесь надо отметить, что на рисунках далее в качестве погрешности указан только коэффициент вариации.

Несмотря на то, что методика Майкельсона дает результаты, находящиеся в хорошем согласии с известными данными, она сопряжена с рядом трудностей, обусловленных требованиями к строгости определения угла падения и плоскопараллельности образца. Неавтоматичность метода (ручное управление и считывание с помощью глаза наблюдателя) заставляет рассмотреть более удобный способ определения показателя преломления – спектроскопический – и применить методику определения показателя преломления для твёрдых растворов галогенидов металлов, разработанную авторами учебника. Несмотря на то, что в его основе лежит та же схема Майкельсона, эта методика характеризуется максимальной автоматичностью и широким набором длин рабочих волн.

Таблица 5.1

Выражения для погрешностей определения показателя преломления, связанных с методикой Майкельсона

Погрешность	Выражение	Примечание
Вклад погрешности интерференционного порядка	$\gamma_{\Delta nm} = \frac{1}{2n}  n_1 - n_2 ,$ <p>где <math>n_j = -0.5(b_j^2 + \sin^2\theta)/d</math>, и <math>b_j = \lambda(m \pm \Delta m_{max})/2d - 1 + \cos\theta</math></p>	$\Delta m_{max} = 0,25$ [4]  $j = 1$ или $2$
Вклад погрешности микрометра	$\gamma_{\Delta nd} = \frac{1}{2n}  n_1 - n_2 ,$ <p>где <math>n_j = -0.5(b_j^2 + \sin^2\theta)/d</math>, и <math>b_j = m\lambda/2(d \pm \Delta d) - 1 + \cos\theta</math></p>	$\Delta d = 2$ мкм,  $j = 1$ или $2$
Вклад погрешности определения угла падения пучка	$\gamma_{\Delta n\theta} = \left  \frac{(b_1^2 - b_2^2) + [\sin^2(\theta + \Delta\theta/2) - \sin^2(\theta - \Delta\theta/2)]}{4n(b_1 - b_2)} \right ,$ <p>где <math>b_j = m\lambda/2d - 1 + \cos(\theta \pm \Delta\theta/2)</math></p>	$\Delta\theta = 1'$ ,  $j = 1$ или $2$



Вклад серийности (коэффициент вариации)	$V = \frac{\sigma_n}{\overline{x_n}} t(i, 0.95)$	$i = 4 \text{ или } 7$
---	--	------------------------

### 5.2.2.3. Спектроскопическое определение действительной части показателя преломления

Автоматизированная модификация методики Майкельсона является более удобной для определения действительной части показателя преломления. Она реализована в ИК-Фурье-спектрометре и отличается лишь тем, что, во-первых, источником излучения является широкополосный источник – глобар (а не источник с фиксированной длиной волны), а во-вторых, картина интерференции не наблюдается глазом оператора, а представляется в виде спектра пропускания, получаемого за счет блока Фурье-разложения. В случае достаточно малой толщины и стабильной плоскопараллельности образцов на спектре может наблюдаться устойчивая интерференция, обусловленная отражением луча от противоположных стенок пластинки. Этот эффект можно использовать для определения показателя преломления пластинки [5]. Суть подхода в том, что количество интерференционных пиков  $N$  в окрестностях интересующей длины волны (например 10,6 мкм, т. е.  $\sim 943 \text{ см}^{-1}$ ) однозначно связано с  $n$  и толщиной образца  $d$ :

$$n = \frac{N \cdot 10^4}{2d(\nu_2 - \nu_1)}, \quad (5.9)$$

где  $\nu_i$  – значения спектроскопической частоты [ $\text{см}^{-1}$ ] на границах диапазона, выбранного для подсчета пиков, а  $10^4$  – коэффициент перехода от длины волны  $\lambda$  [мкм] к частоте через  $\nu = 10^4 / \lambda$ . Данная формула справедлива в том случае, если уровень пропускания остается постоянным по величине во всем диапазоне длин волн (спектроскопических частот), выбранном для подсчета пиков. Без этого приближения в правую часть формулы входило бы слагаемое  $\lambda(dn / d\lambda)$  со знаком «минус» [6], учитывающее наклон спектра, который иногда отличен от нуля. Для нивелирования погрешности этого приближения нужно оценить геометрию пика и выбрать равноправные максимумы (или минимумы) на границе рассматриваемого диапазона, которые не всегда совпадают с истинными из-за небольшого наклона спектра. Данной методикой

были определены показатели преломления всех составов твёрдых растворов галогенидов металлов. Спектр пропускания характерных образцов приведен на рис. 5.8. Его УФ-БИК часть от 0,19 до 1,10 мкм снята на UV-NIR-спектрофотометре Shimadzu UV-1800 с нанометровым разрешением и однократным сканированием. MIR – часть от 2,0 до 40,0 мкм снята на спектрофотометре Shimadzu IRPrestige-21 (принцип FTIR –Fourier transform infrared spectroscopy) с делителем CsI (ограничивает глобар до 41,6 мкм), детектором DLaTGS (дейтерированный триглицинсульфат, легированный L-аланином) и двадцатикратным сканированием с разрешением  $8\text{ см}^{-1}$ . Вставка на рис. 5,8 – фрагмент спектра  $\text{Ag}_{0,99}\text{Tl}_{0,01}\text{Br}_{0,99}\text{I}_{0,01}$ , снятого с бóльшим разрешением ( $0.5\text{ см}^{-1}$  при тридцатикратном сканировании). На фрагменте видны десять идеальных пиков (точнее, разница в десять пиков между двумя крайними), по которым и был определен показатель преломления.

#### *Обоснование выбора количества пиков*

В принятом ранее приближении, согласно которому множителем, ответственным за изменение показателя преломления с длиной волны, можно пренебречь, возникает примечательное следствие. Как видно из уравнения (5.9), показатель преломления прямо пропорционален числу пиков  $N$  и обратно пропорционален разности спектроскопических частот, причем связь последних двух величин очевидна. Несмотря на это, она не прямая, так как в реальности учитывает дисперсию, выражающуюся в том числе в наклоне спектра. В частности, это приводит к необходимости выбрать такое количество пиков, в пределах которых показатель преломления может быть определен с

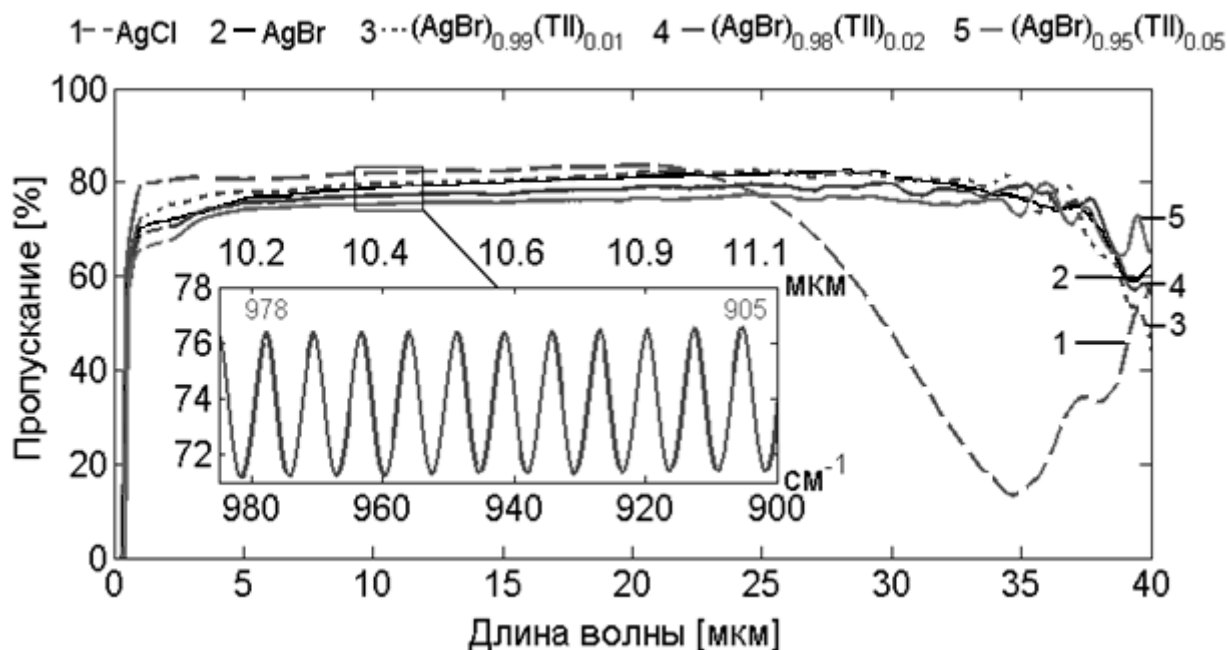


Рис. 5.8. Спектры пропускания трех составов, содержащих монойодид таллия, в сравнении со спектрами чистых хлорида и бромида серебра. Пунктиром отмечена область, выпадающая из рабочих диапазонов спектрофотометров.

Вставка показывает увеличенный фрагмент спектра  $\text{Ag}_{0.99}\text{Tl}_{0.01}\text{Br}_{0.99}\text{I}_{0.01}$  с сильной интерференцией в области  $10,6 \pm 0,5$  мкм, снятого с высоким разрешением с целью определения по нему показателя преломления наибольшей достоверностью. В данном случае мы использовали  $N = 10$  пиков, так как ниже этого значения вклад спектрометра в погрешность определения  $n$  был значительным, а после этого значения спектр претерпевал наклон, из-за которого нельзя было в полной мере воспользоваться формулой (5.9). Пример варьирования показателя преломления с числом пиков показан на рис. 5.9. На вставке видно, что большее количество пиков соответствует меньшей погрешности определения  $n$ .

#### *Погрешность методики*

Как видно из уравнения (5.9), в приближении равного пропускания в интервале снимаемых пиков вклад в погрешность определения показателя преломления могут дать разрешение спектрофотометра ( $\Delta\nu$  [ $\text{см}^{-1}$ ]) и погрешность микрометра ( $\Delta d$  [мкм]). При рассмотрении абсолютной погрешности нахождения показателя преломления как полуразности значений  $n$ , определенных максимально неточно, т. е. при экстремальных значениях каждой из погрешностей приборов, выражения для относительной погрешности (меньше абсолютной в  $n$  раз) принимают вид, указанный в табл. 5.2. В среднем суммарная относительная погрешность составила 0,004.

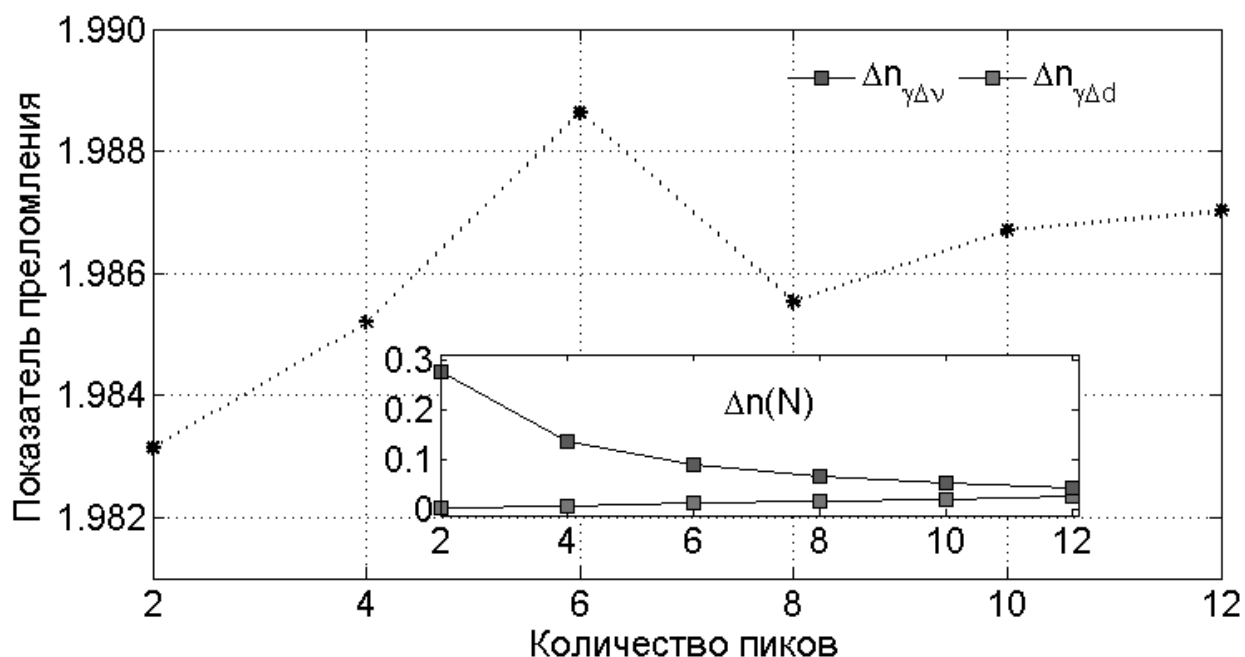


Рис. 5.9. Зависимость показателя преломления от количества интерференционных пиков  $N$  на примере хлорида серебра. Вставка демонстрирует оптимальное значение  $N$  с точки зрения снижения суммарного вклада основных погрешностей определения  $n_{\text{AgCl}}$ .  $\Delta n_{\gamma\Delta v}$  и  $\Delta n_{\gamma\Delta d}$  – абсолютные погрешности спектрометра и микрометра, соответственно

Таблица 5.2

Выражения для погрешностей определения показателя преломления, связанных со спектроскопической методикой [7]

Погрешность	Выражение	Примечание
Вклад погрешности FTIR в расчете на $\nu$ -шкалу	$\gamma_{\Delta n\nu} = \left  \frac{N}{2nd} \frac{10^4}{[(\nu_1 - \nu_2)^2 - \Delta\nu^2]} \Delta\nu \right $	$\Delta\nu = 0,5 \text{ см}^{-1}$
Вклад погрешности микрометра в расчете на $\nu$ -шкалу FTIR	$\gamma_{\Delta nd} = \left  \frac{N}{2n(\nu_1 - \nu_2)} \frac{10^4}{(d^2 - \Delta d^2)} \Delta d \right $	$\Delta d = 2 \text{ мкм}$

#### 5.2.2.4. Определение мнимой части показателя преломления

В соображениях выше, как и в дальнейших расчетах и рассуждениях, речь идет о действительной части показателя преломления  $n$ ,

так как именно эта величина отвечает за взаимодействие материала с пропускаемым через него малопоглощаемым излучением. Однако спектроскопическая методика позволяет определить и мнимую часть показателя преломления  $k$ , отвечающую за экстинкцию света в материале (поглощение и гашение). С этой точки зрения полный комплексный показатель преломления записывается как

$$\eta = n - ik. \quad (5.10)$$

Авторы [8] предлагают изящную методику вычисления коэффициента экстинкции по спектру пропускания через интерпретацию закона Бугера – Ламберта. Следуя их логике, коэффициент  $k$  выводят из показателя поглощения  $K$ , что справедливо для конкретной длины волны:

$$k = \frac{K\lambda}{4\pi}. \quad (5.11)$$

В свою очередь, показатель поглощения находится следующим образом:

$$K = \frac{-\ln(\alpha)\lambda}{d}, \quad (5.12)$$

где  $d$  – толщина образца [мкм], а  $\alpha$  – соотношение прошедшей через образец и исходной интенсивностей света либо связанных с ней характеристик. Авторы [8] предлагают следующую интерпретацию  $\alpha$  для спектра пропускания пластинки с четкой интерференцией в рассматриваемом диапазоне длин волн при условии слабого поглощения света:

$$\alpha = \frac{(n+1)^2[(T_{\max}/T_{\min})^{1/2}-1]}{(n-1)^2[(T_{\max}/T_{\min})^{1/2}+1]}, \quad (5.13)$$

где  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  – значения пропускания на экстремумах центрального пика, соответствующего искомой длине волны.

#### 5.2.2.5. UV-NIR спектроскопическое определение показателя преломления на краю поглощения

Располагая всем UV-MIR-спектром для каждого материала, как показано на рис. 5.8, можно определить показатель преломления и в UV-NIR-области. И если от 1 мкм  $n$  можно определять спектроскопически благодаря стабильной и четкой интерференции, в ближневолновой области эта методика не дала интерференцию. В первую очередь

это обусловлено тем, что метод горячего прессования не позволяет получить пластинки толщиной в несколько микрометров, где UV-NIR-интерференция могла бы наблюдаться; но даже в случае получения ее вблизи края окна прозрачности материала (в данном случае это видимая область) показатель преломления на самом краю удобнее и точнее определять другой методикой.

*Определение края поглощения в  $\lambda$ -эквиваленте*

UV-NIR-спектры всех образцов были пересняты с помощью того же спектрофотометра (Shimadzu UV-1800). Помимо ярко выраженной интерференции вблизи 1 мкм, усиленной увеличением разрешения съемки до 0,05 нм, которая будет обсуждена далее, спектры позволяют весьма точно определить длину волны края собственного поглощения (рис. 5.10).

Край поглощения определялся известной методикой двух касательных. Она заключается в следующем: рассматриваются два участка спектра вблизи края поглощения; оба они являются прямыми в определенном диапазоне; в этом диапазоне выбираются две точки и через последние проводятся прямые; абсциссой точки их пересечения будет являться длина волны края поглощения (рис. 5.11). Уравнения обеих аппроксимирующих кривых – «левой»  $Y_l(X)$  и «правой»  $Y_r(X)$  – выглядят так:

$$\begin{cases} Y_l = \frac{(Y_{12}-Y_{11})(X-X_{11})}{X_{12}-X_{11}} + Y_{11} \\ Y_r = \frac{(Y_{22}-Y_{21})(X-X_{21})}{X_{22}-X_{21}} + Y_{21} \end{cases}, \quad (5.14)$$

где  $X$  [нм] – это переменная в виде массива длин волн, экспортированного из спектра.

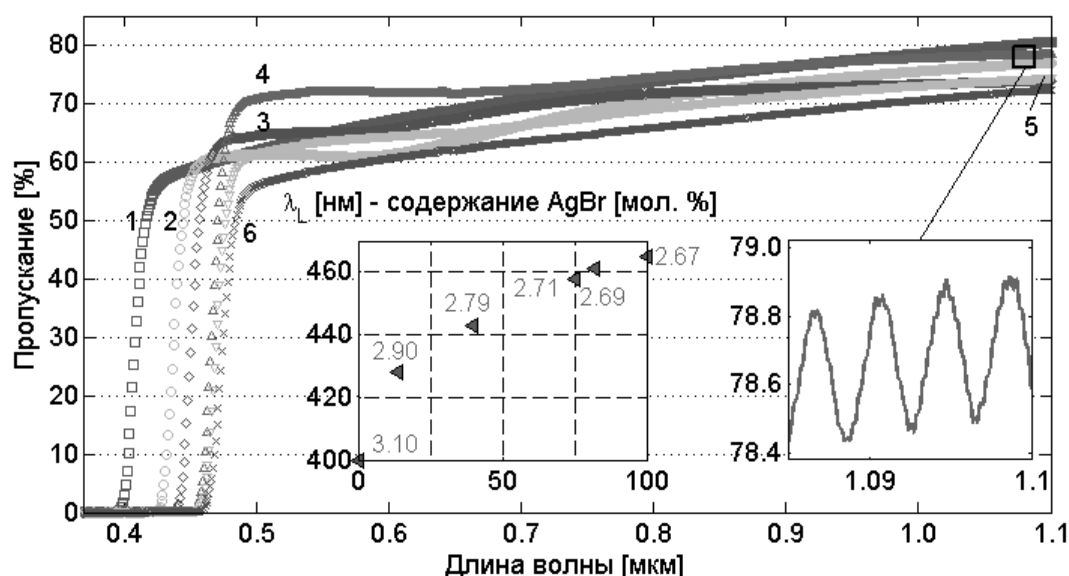


Рис. 5.10. UV-NIR-спектр пропускания шести пластинок  $\text{AgCl}_{1-x}\text{Br}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ). Содержание замещающего агента (AgBr), мол. %: 1 – 0; 2 – 14; 3 – 40; 4 – 75; 5 – 82; 6 – 100. Левая вставка: зависимость края собственного поглощения ( $\lambda_L$ , нм) и ширины запрещенной зоны ( $E_g$ , эВ) от состава. Правая вставка – увеличенный фрагмент спектра  $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$  с разрешением 0,05 нм для спектроскопического определения показателя преломления

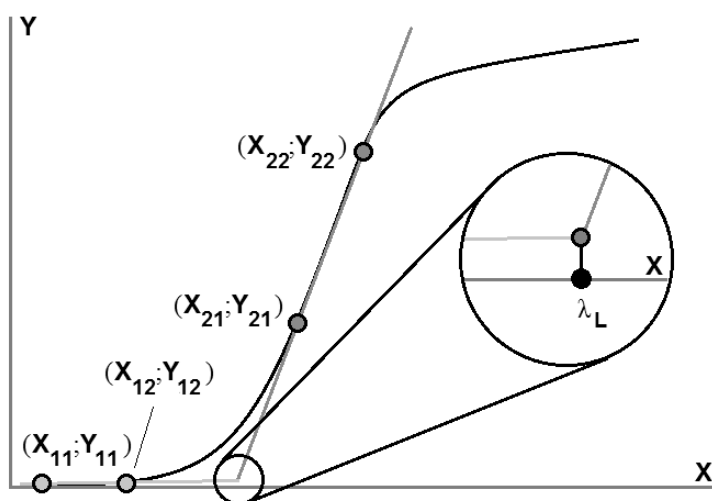


Рис.5.11. К методу двух касательных применительно к определению длины волны края собственного поглощения

При использованном разрешении 1 нм данная методика не позволяет различить составы с разницей в концентрации замещающего агента менее 2 мол. %, поэтому для образцов с содержанием AgBr в 82 и 84 мол. % значение края поглощения получилось одинаковым. Поэтому на дальнейших графиках второй состав отсутствует. Результаты определения  $\lambda_L$  приведены на вставке к рис. 5.10. Очевидно, край по-

глощения сдвигается в сторону бóльших длин волн при увеличении содержания замещающего компонента  $\text{AgBr}$  в системе  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$  и  $\text{TiI}$  в системе  $\text{AgBr} - \text{TiI}$ .

### 5.2.3. Определение фотостойкости

Измерение фотостойкости материалов проводили с помощью ИК-Фурье-спектрометра Shimadzu IRPrestige-21 (делитель  $\text{KBr}$ , детектор –  $\text{DLaTGS}$ , диапазон съемки –  $7800\text{--}350\text{ см}^{-1}$ , разрешение –  $4\text{ см}^{-1}$ ). Спектры пропускания снимались с образцов до облучения и использовались для снятия последующих спектров в качестве фона, таким образом могут быть получены данные об относительном снижении интенсивности пропускания. Для облучения исследуемую пластину в держателе помещали под специальное устройство для облучения (рис. 5.12), где она находится под воздействием УФ-лампы с излучением в широком диапазоне длин волн и пиком интенсивности в  $300 - 370\text{ нм}$ . Таким образом, осуществляются поэтапный набор дозы УФ-облучения и съёмка спектров пропускания всех образцов.

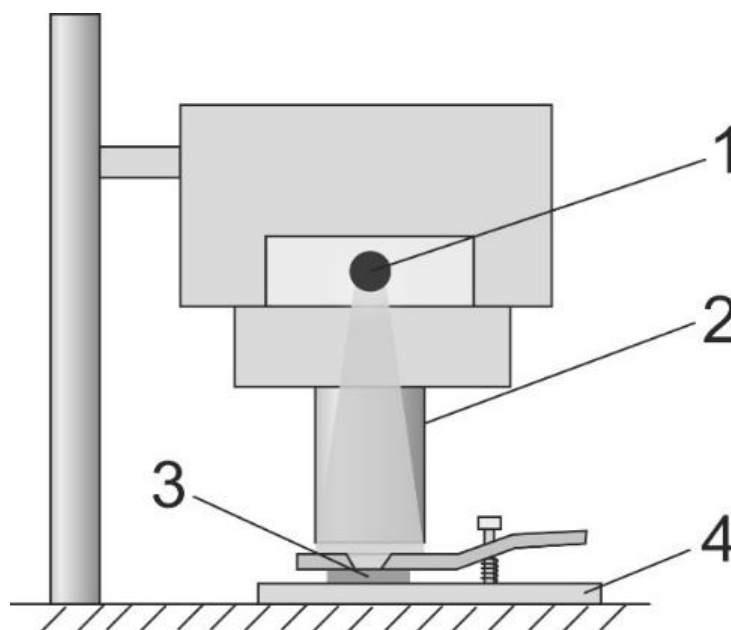


Рис. 5.12. Установка для облучения пластин. 1 – УФ-лампа; 2 – защитный рукав; 3 – облучаемый образец; 4 – держатель пластин

На рис. 5.13 показан один из изучаемых образцов, видно, что в месте облучения происходит изменение материала образцов, и на поверхности образуется тонкая непрозрачная пленка.



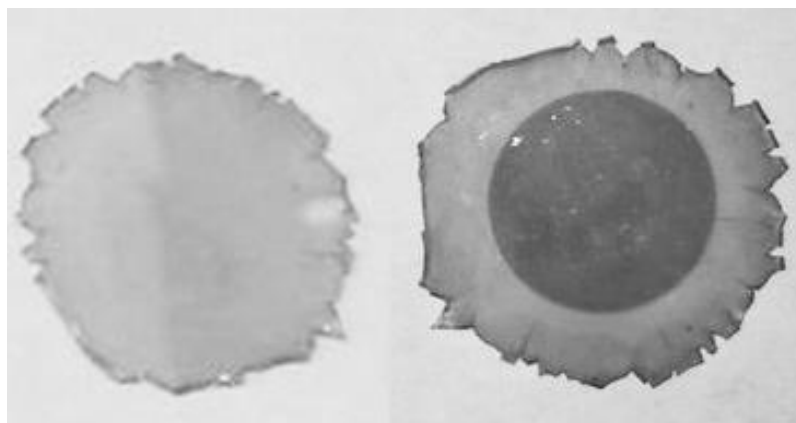


Рис. 5.13. Фотографии образца  $\text{Ag}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$  до и после облучения УФ-лампой

#### 5.2.4. Определение пропускания ИК-световодов

Определение спектральных характеристик ИК-световодов проводилось с использованием ИК-Фурье-спектрометра IRAffinity-1 (Shimadzu) с делителем KBr в диапазоне 1,28–28,7 мкм и волоконным блоком подключения световодов посредством SMA 905 оптических разъемов. Существует два варианта получения необходимого спектра ИК-световода с использованием ИК-Фурье-спектрометра.

1. Съёмка в фоновом режиме (BKG) исследуемого ИК-световода, непосредственно подключенного к волоконному блоку подключения. В результате происходит построение характерного для спектрометра «колоколообразного» спектра (рис. 5.14). Данный спектр характеризуется наличием полос поглощения воды, углекислого газа и складывается из особенностей оптической схемы спектрометра (спектральная характеристика источника, приёмника, делителя луча, зеркал, оптических окон) и, конечно, из спектральной характеристики исследуемого образца.

Такой метод отличается быстротой реализации и качественно показывает диапазон прозрачности ИК-световода.

2. Съёмка спектральной характеристики ИК-световода с использованием замыкающего тестового волокна в режиме вычитания фона.

Устранить недостатки предыдущего способа возможно, замкнув оптическую схему волоконного блока подключения коротким отрезком ИК-световода, работающим в максимально широком спектральном диапазоне (рис. 5.15).

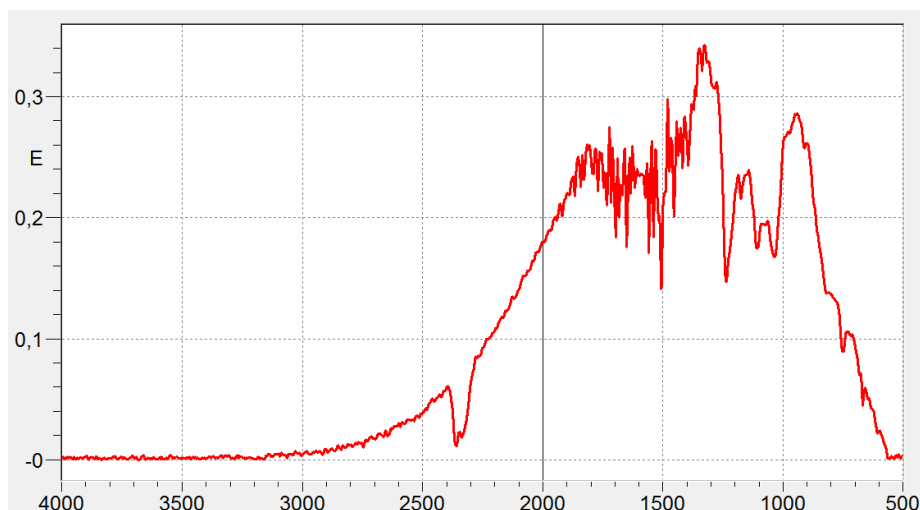


Рис. 5.14. Спектр фона (BKG) ИК-световода на спектрометре IR-Prestige 21 с использованием DLATGS -детектора. Съёмка фона: 64 скана, разрешение  $8 \text{ см}^{-1}$ . Использован блок подключения световодов

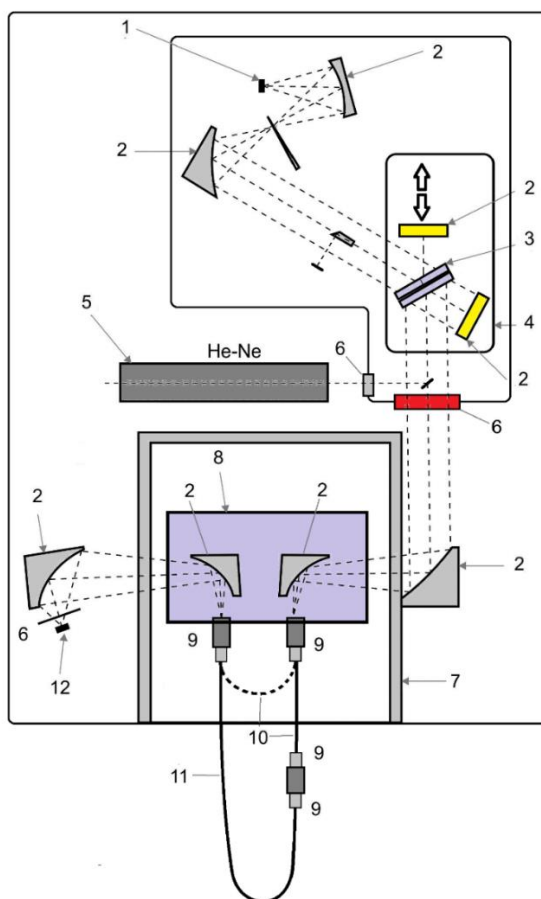


Рис. 5.15. Схема измерения спектров пропускания ИК-световодов на ИК-Фурье-спектрометре IR-Prestige 21 с волоконным блоком подключения.  
 1 – источник ИК-излучения; 2 – зеркала; 3 – светоделитель; 4 – блок интерферометра Майкельсона; 5 – HeNe-лазер; 6 – оптические окна;  
 7 – кюветное отделение; 8 – волоконный блок подключения; 9 – оптические SMA разъёмы; 10 – замыкающее (тестовое) волокно (пунктиром показана съёмка в режиме BKG); 11 – исследуемый ИК-световод;  
 12 – приёмник ИК-излучения

Сперва производится съёмка фона с использованием замыкающего волокна, а затем съёмка образца исследуемого волокна, включённого последовательно в оптический тракт с замыкающим волокном. Используя стандартную методику ИК-Фурье-спектрометра, связанную с вычитанием спектра фона из спектра образца, можно получить чистый спектр исследуемого ИК-световода (рис. 5.16). Но нужно иметь в виду, что у каждого тестового волокна есть свой определённый диапазон прозрачности, поэтому необходимо иметь набор таких волокон с различными диапазонами пропускания (аналогично набору светоделителей ИК-Фурье-спектрометра). Используемый спектрометр имеет диапазон работы 1,28–41,6 мкм (KBr-, CsI-делители), тестовые волокна, используемые при съёмке, имеют диапазоны работы 0,3–2,7 мкм –  $\text{SiO}_2$ , 2,5–20,0 мкм –  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ , 5,0–25,0 мкм 5 мол. %  $\text{Ti}$  в  $\text{AgBr}$ .

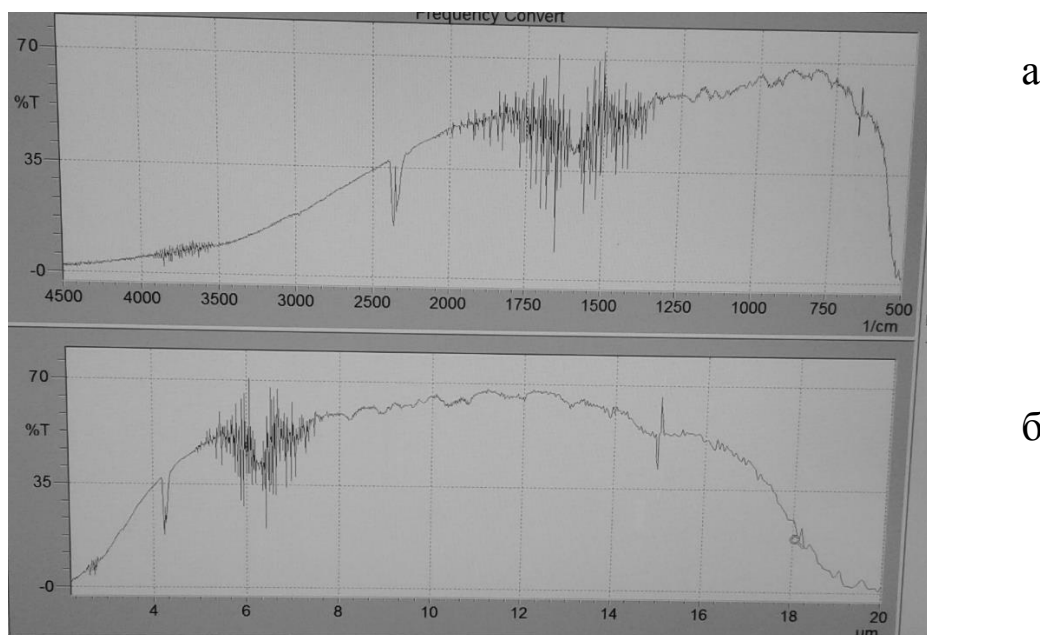


Рис. 5.16. Спектр пропускания световода состава  $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$  длиной 1 м при схеме измерения с подключением оптического блока и тестового световода к ИК-спектрометру, ось абсцисс: а)  $\text{см}^{-1}$ , б) мкм

### 5.2.5. Метод отрезков при определении оптических потерь в ИК-световодах

Измерение оптических потерь проводится на специальном стенде. Для определения оптических потерь исследуемых материалов использовался стенд, собранный из оптических компонентов на базе комплектующих производства Standa (оптический стол 900x1800,

трехкоординатные линейные трансляторы), представленных на рис. 5.17 [9–16].

Расчет оптических потерь  $\alpha$  дБ/м, волокна производился так называемым методом отрезков по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{1}{l_2 - l_1} 10 \lg \frac{p_2}{p_1}, \quad (5.15)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – значения мощности излучения на выходе из световода и его отрезка, соответственно,  $l_2$  – общая длина световода,  $l_1$  – длина отрезка световода.

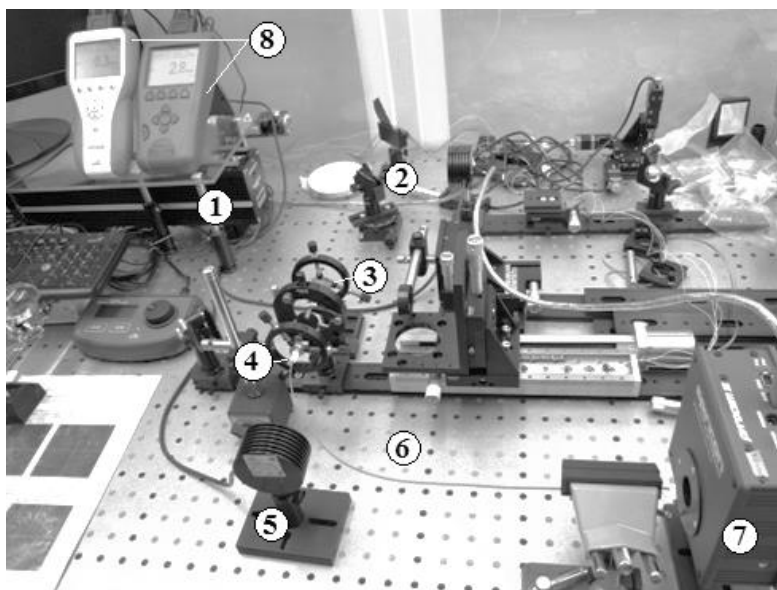


Рис. 5.17. Стенд для измерения оптических потерь: 1 – CO<sub>2</sub>-лазер; 2 – Si окно; 3 – ZnSe линза; 4 – держатель ИК-волокна; 5 – термоголовка; 6 – ИК-световод; 7 – CCD камера Spiricon; 8 – дисплеи термоголовок

#### **5.2.6. Исследование пространственного распределения мод, вытекающих из ИК-световодов**

Исследование дальнего поля излучения для полученных световодов проводили на оптическом стенде с использованием CO<sub>2</sub>-лазеров и пироэлектрической камеры (см. рис. 5.17). Фокусировку осуществляли линзой ZnSe с фокусным расстоянием 50 мм. Данный стенд позволяет определить профиль вытекающего из световода излучения, распределение интенсивности в дальнем поле, а также оптические потери на длине волны 10,6 мкм.

Pyrocam III (Spiricon) – высокопроизводительная твердотельная пироэлектрическая камера. Она позволяет проводить точные измерения и анализ как больших, так и низких по уровню сигналов с исполь-

зованием лазерного луча. Равномерная чувствительность в инфракрасном диапазоне и большой динамический диапазон делают эту камеру подходящей для термического формирования изображений горячих источников в реальном времени. 14-разрядная оцифровка также позволяет точно проводить суммирование и усреднение сигналов с целью выделения сигналов низкого уровня на уровне шума.

Камера имеет модификацию РУ-III-С-А, содержит детектор класса А с одним стандартным окном, изготовленным из германия с дополнительно нанесенным просветляющим покрытием для диапазона длин волн 8–12 мкм.

Данная модификация позволяет проводить измерения в импульсном режиме и режиме постоянного излучения.

Характеристики матрицы детектора: количество элементов 15376 (124 x 124); активная площадь 12,4 x 12,4 мм; расстояние между элементами 100 x 100 мкм; Размер пикселя 85 x 85 мкм; материал детектора LiTaO<sub>3</sub>; рабочий диапазон длин волн составляет от 157 до 355 нм и от 1,06 до >1000 мкм.

Характеристики непрерывного режима работы (используется встроенный 8 лопастной модулятор частоты прерываний 24 и 48 Гц):

1) чувствительность – 220 нВт/пиксель (24 Гц); 320 нВт/пиксель (48 Гц); 2,2 мВт/см<sup>2</sup> (24 Гц); 3,2 мВт/см<sup>2</sup> (48 Гц);

2) эквивалентная мощность шума 45 нВт/Гц<sup>1/2</sup> /пиксель (1 Гц) (Прерывание на частоте 24 Гц и усреднение по 24 кадрам);

3) мощность насыщения – 2,2 Вт/см<sup>2</sup> (24 Гц); 3,2 Вт/см<sup>2</sup> (48 Гц);

4) предельная мощность разрушения – на всю матрицу 2 Вт; пиковая плотность энергии 8 Вт/см<sup>2</sup>;

5) для обработки снимков с камеры используется программа LBA-PC. Данная программа позволяет получить следующие результаты: общая мощность или энергия; пиковая мощность или энергия; координаты пиков в микрометрах; положение центра тяжести в микрометрах; ширина пучка по осям X и Y в микрометрах; значения максимальной и минимальной плотности энергии в отображаемом кадре; расчёт корреляции между исследуемой картиной распределения энергии и поверхностью Гаусса; определение эффективного диаметра пучка излучения в зависимости от уровня задаваемой мощности (мощность в пучке / общая падающая мощность).

Излучатель лазерный отпаянный мощностью 10 Вт (СО<sub>2</sub>-лазер), SYNRAD (США), рабочая длина волны – 10,6 мкм, воздушное охлаждение. Используется в качестве источника когерентного излучения

для исследования оптических потерь и прочих свойств оптических волокон.

### **5.2.7. Определение спектров люминесценции волоконных сцинтилляторов**

Спектр люминесценции волоконных сцинтилляторов инфракрасных волокон снимался в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина на установке АСНИ РОСТТ на кафедре экспериментальной физики (автоматизированная система научных исследований радиационно-оптических свойств твердых тел). Установка включает рентгеновский аппарат УРС-01 (140 кэВ), рабочую камеру с криостатом, оптическую систему линз (для фокусировки свечения образца), монохроматор МДР-2 (спектральный диапазон 210 – 800 нм), фотоэлектронный умножитель ФЭУ-106 или ФЭУ-97, а также электронный спектрометрический тракт обработки сигнала, блок сопряжения с компьютером (микроконтроллер) и сам компьютер. Схема установки представлена на рис. 5.18. Явление люминесценции связано с излучательной диссипацией поглощенной веществом энергии. Процессы поглощения и люминесценции в твердых телах могут происходить внутри одних и тех же центров.

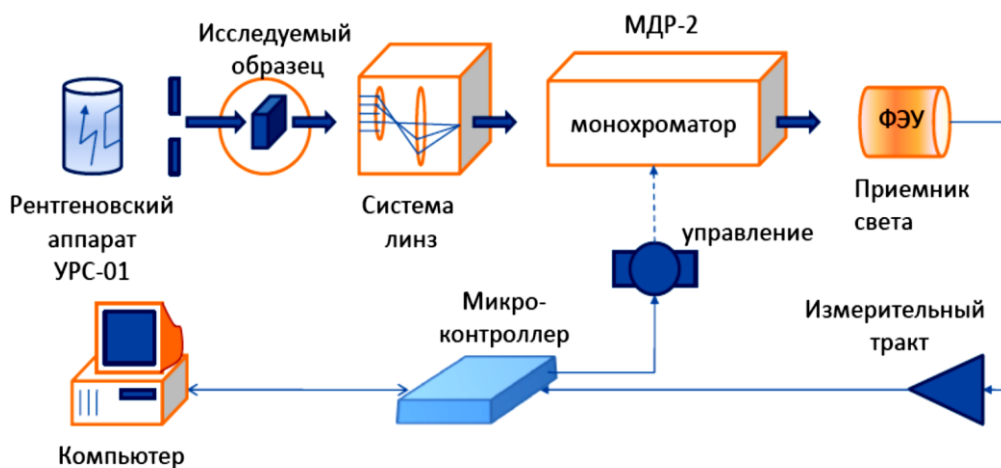


Рис. 5.18. Схема установки для измерения спектров рентгенолюминесценции АСНИ-РОСТТ на кафедре экспериментальной физики УрФУ

Данный метод исследований основан на регистрации излучения, которое возникает при переходе центра, возбужденного падающим светом, в основное состояние, и поэтому характеризуется определенной продолжительностью, которая определяется временем жизни центра в возбужденном состоянии, связанного с энергетической шириной

возбужденного уровня, а также с возможными безызлучательными релаксациями.

#### **5.2.8. Исследование радиационной стойкости ИК-световодов**

Изучение радиационной стойкости световодов на основе твёрдых растворов  $\text{AgBr} - \text{TlI}$  и  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$  проводилось на линейном ускорителе электронов модели УЭЛР-10-10С. Энергия ускоренных электронов составляла 10 МэВ, мощность ускорителя – 10 кВт. Ток пучка электронов – 700 мкА. Ускоритель установлен и функционирует в специальном зале при кафедре экспериментальной физики в ИВЦ радиационной стерилизации физико-технологического института УрФУ.

Дозы электронного облучения набирались последовательно. Они были равны 10 и 18 кГр. После облучения исследуемые ИК-волокна (длина 1 м, диаметр 1,12 мм, материал оболочки фторопласт, материал коннекторов титан) измерялись на ИК-Фурье-спектрометре IR-Prestige 21 с использованием КРТ-детектора. Съёмка велась при следующем режиме: 64 скана, разрешение  $8 \text{ см}^{-1}$ . Использован блок подключения оптоволоконного зонда к ИК-Фурье-спектрометру.

Испытывались образцы световодов на исследовательской ядерной установке ИВВ-2М АО «ИРМ».

Облучение проводится в мокром канале, устанавливаемого во внутреннюю чехловую трубу ТВС.

Параметры облучения:

- доза облучения контейнера №1 – 70 кГр (время набора дозы определяется по предварительной аттестации ячейки облучения);
- доза облучения контейнера № 2 – 500 кГр (время набора дозы определяется по предварительной аттестации ячейки облучения).

Для определения длительности облучения произведены измерения мощности дозы в данной ОТВС в месте размещения ампул при помощи гамма-камеры КтВ-7.

Гамма-камера КтВ-7 выполнена в виде трубки внешним диаметром 6 мм. Чувствительная часть камеры имеет длину 50 мм. Центр чувствительной части расположен на расстоянии 140 мм от нижнего торца гамма-камеры. Гамма-камера КтВ-7 отградуирована на стандартный материал – воду (протокол градуировки №31-20/595 от 24.11.2008 г.). Коэффициент чувствительности гамма-камеры составляет –  $8,4 \cdot 10^{-14} (\text{А} \cdot \text{ч})/\text{Р}$ .

Схема подключения камеры КтВ-7 к источнику питания Б5-50 и к измерительному прибору АМ-1038 представлена на рис. 5.19.

После подключения к измерительному прибору и источнику питания гамма-камера КтВ-7 загружалась в «мокрый» канал, установленный в ОТВС. Затем снимались показания напряжения на шунтирующем резисторе  $R$ . По полученному значению напряжения определена сила тока в цепи по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (5.17)$$

где  $I$  – искомая величина силы тока, А;  $U$  – измеренное напряжение на шунтирующем резисторе, В;  $R$  – сопротивление шунта, Ом,  $R=1 \cdot 10^8$  Ом.

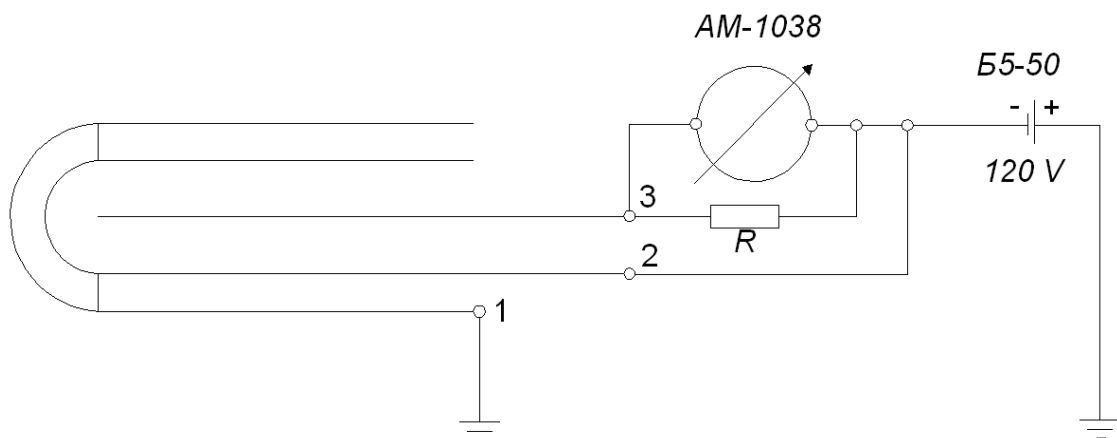


Рис. 5.19. Схема подключения камеры КтВ-7 к источнику питания Б5-50 и к измерительному прибору АМ-1038

После определения силы тока в цепи получено значение мощности дозы в световодах по формуле

$$W_\gamma = \frac{I}{\varepsilon} \frac{\gamma_m}{\gamma_{H_2O}}, \quad (5.18)$$

где  $W_\gamma$  – искомая мощность дозы гамма-излучения в пересчете на материал световодов, Р/ч;  $\varepsilon = 8,4 \cdot 10^{-14}$  (А · ч)/Р – чувствительность гамма-камеры;  $\gamma_m$  – массовый коэффициент истинного поглощения материала световодов, см<sup>2</sup>/г;  $\gamma_{H_2O}$  – массовый коэффициент истинного поглощения воды, см<sup>2</sup> / г.

Погрешность измерения мощности дозы гамма-излучения при помощи гамма-камеры КтВ-7 составляет 15 %.

После облучения из контейнеров извлекается внутренняя капсула, и передаётся для оценки оптических свойств образцов световодов на спектрометре IR-Prestige 21 Shimadzu.



### 5.3. Механические свойства нанокристаллических ИК-световодов

#### 5.3.1. Определение предела прочности ИК-световодов на разрыв

Для определения способности материала сопротивляться деформациям используют понятие «прочность» или «предел прочности», называемый также временным сопротивлением. Предел прочности  $\sigma_{пч}$  определяется по формуле:

$$\sigma_{пч} = \frac{F_{max}}{A_0}, \quad (5.16)$$

где  $\sigma_{пч}$  – предел прочности (временное сопротивление), Па;  $F_{max}$  – максимальное усилие на образец при растяжении, Н;  $A_0$  – начальная площадь сечения образца, м<sup>2</sup>.

Предел прочности определялся на образцах ИК-световодов (например диаметром 1,1 мм и длиной 10 см). Испытания на растяжение проводились на испытательной машине Shimadzu AGS-10kNX. За основу метода взят ГОСТ 1497 – 84. Были исследованы образцы четырех разных составов с концентрацией иодида одновалентного таллия, в мол. %, С 0,5; 3; 5 и 7.

Определение предела прочности на разрыв проводилось на универсальной испытательной машине AG-50 kNXD (Shimadzu) с возможностью создания максимальной нагрузки в 50 кН. Волокно устанавливали в клиновинтовые захваты и проводили испытание на растяжение со скоростью перемещения траверсы 20 мм/мин и нагрузке 10 кН.

Предел прочности на разрыв – это величина нагрузки, при превышении которой происходит разрушение. Данный параметр характеризует прочность материала [17–20].

#### 5.3.2. Исследование зависимости влияния состава кристаллов на коэффициент Пуассона, модуль Юнга и модуль сдвига

Коэффициент Пуассона и модуль упругости определяются при сжатии на цилиндрических образцах кристаллов диаметром 20 мм и высотой 10 мм по ГОСТ 24452 – 80 [21]. Сжатие образцов ИК-материалов проводилось на испытательной машине AGS-10kNX (Shimadzu, Япония).

## Выводы по главе 5

Глава посвящена методам исследования функциональных свойств кристаллов и ИК-световодов на их основе. Для этих целей существует комплекс новых экспериментальных методик и оборудования. Термодинамическое исследование диаграмм плавкости новых многокомпонентных систем  $\text{AgBr} - \text{TlI}$ ,  $\text{AgBr} - (\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54})$  и др. проводится с помощью блока ДТА, который подключается к новой ростовой установке ПКБ-01 – печи конструкции Бриджмена. Исследование состава и структуры выполняется с помощью снятия дифрактограмм и рентгеноструктурного анализа с заранее подготовленных образцов.

Дисперсия показателей преломления для новых кристаллов систем  $\text{AgBr} - \text{TlI}$ ,  $\text{AgBr} - (\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54})$ ,  $\text{AgBr} - \text{AgI}$  и ранее изученных систем  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ ,  $\text{AgCl} - \text{AgBr} - \text{AgI}(\text{Tl})$  определяется по трем методам в зависимости от химического состава и длины волны при  $P = 1$  атм и  $25^\circ\text{C}$ : метод Майкельсона, спектроскопический метод и определение  $n$  по ближневолновому краю поглощения.

Для измерения диапазона прозрачности ИК-световодов используется метод, основанный на подключении оптического блока (разработанного автором) к ИК-спектрометру и тестовому волокну. Тестовые волокна, используемые при съёмке, имеют диапазоны работы от 0,3 до 2,7 мкм для  $\text{SiO}_2$ ; от 2,5 до 20,0 мкм для  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ ; от 5,0 до 25,0 мкм для  $\text{Ag}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$ .

Приведены новые методики для определения фотостойкости и измерения механических свойств кристаллов и ИК-световодов, методики по определению радиационной стойкости ИК-световодах и по определению оптических потерь в световодах методом отрезков. Для исследований по определению примесей в кристаллах и световодах используются следующие методы: рентгенофлуоресцентный и рентгенофазовый анализы, атомно-эмиссионная спектроскопия, оптическая и сканирующая электронная микроскопия.

### Задачи

1. Используя метод отрезков, определите собственные потери в волокне, если  $P_1$  и  $P_2$  – мощность излучения на выходе из световода и его отрезка соответственно,  $l_2$  – общая длина световода,  $l_1$  – длина отрезка световода. Значения данных параметров приведены в таблице.

Значения параметров для решения задачи 1

№ варианта	P <sub>1</sub> , %	P <sub>2</sub> , %	l <sub>1</sub> , см	l <sub>2</sub> , см
1	75	78	20	10
2	64	70	20	12
3	65	70	20	15
4	68	74	20	12
5	70	82	20	10
6	72	80	20	12
7	78	85	20	8
8	80	89	20	5
9	82	90	20	5
10	84	88	20	8

2. В интерферометре Майкельсона при повороте образца происходит изменение разности фаз падающих лучей, вследствие чего меняется интерференционная картина. Количество таких превращений  $m$  и угол поворота образца  $\theta$  связываются с показателем преломления  $n$  образца выражением (5.1). Определите коэффициент  $b$  и показатель преломления образца  $n$ , если известны длина волны падающего излучения  $\lambda=10,6$  мкм, толщина и угол образца  $\theta$  и количество изменений  $m$ .

Значения параметров для решения задачи 2

№ варианта	$m$	$d$ , мкм	$\theta$ , °
1	1	100	5
2	2	200	7,5
3	1	300	4
4	2	400	8
5	1	500	3
6	2	100	7,5
7	1	200	5
8	2	300	8
9	1	400	2
10	2	500	5

### *Библиографический список*

1. Ормонт, Б. Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников / Б. Ф. Ормонт. — Москва : Высшая школа, 1973. — 647 с.
2. Structure modeling and growing  $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$ ,  $\text{Ag}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Br}_{1-x}\text{I}_x$ , and  $\text{Ag}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Cl}_y\text{I}_z\text{Br}_{1-y-z}$  crystals for infrared fiber optics / A. Korsakov [et al.] // J. Cryst. Growth. — 2014. — Vol. 386. — P. 94-99.
3. Жукова, Л. В. Новые инфракрасные материалы: кристаллы и световоды : монография. / Л. В. Жукова, А. С. Корсаков, Д. С. Врублевский. — Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2014. — 280 с.
4. Fendley, J. J. Measurement of refractive index using a Michelson interferometer / J. J. Fendley // Phys. Educ. — 1982. — Vol. 17, № 5. — P. 209-211.
5. Padera, F. Measuring Absorptance (k) and Refractive Index (n) of Thin Films with the PerkinElmer Lambda 950/1050 High Performance UV-Vis/NIR / F. Padera // Spectrometers Application note: UV/Vis Spectroscopy, 2013. — Shelton : PerkinElmer Inc. — 14 p.
6. Rogers, J. R. Conversion of group refractive index to phase refractive index / J. R. Rogers, M. D. Hopler // J. Opt. Soc. Am. A. — 1988. — Vol. 5, № 10. — P. 1595-1600.
7. Korsakov, A. S. Measuring spectral transmission and refractive index of  $\text{AgCl}_{1-x}\text{Br}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) and  $\text{Ag}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Br}_{1-x}\text{I}_x$  ( $0 \leq x \leq 0,05$ ) at the wavelength of  $10,6 \mu\text{m}$  / A. S. Korsakov, D. S. Vrublevsky, L. V. Zhukova // Opt. Mat. — 2015. — Vol. 50. — P. 204-207.
8. Dharma J. Simple method of measuring the band gap energy value of  $\text{TiO}_2$  in the powder form using a UV/Vis/NIR spectrometer / J. Dharma // Spectrometers Application note: UV/Vis Spectroscopy, 2012. — Shelton : PerkinElmer Inc. — 4 p.
9. Mechanisms of optical losses in polycrystalline KRS-5 fibers / V. G. Artjushenko [et al.] // J. Lightwave Technology. — 1986. — Vol. 4, № 4. — P. 461-465.
10. Механизм объемного рассеяния в поликристаллических материалах и световодах среднего ИК-диапазона / Л. Н. Бутвина [и др.] // Труды ИОФАН. — 1988. — Т. 15. — С. 18-32.
11. Bunimovich, D. Dielectric properties of silver halide and potassium halide crystals / D. Bunimovich, A. Katzir // Appl. Opt. — 1993. — Vol. 32, №. 12. — P. 2045-2048.

12. Mechanisms of optical losses in polycrystalline KRS-5 fibers / V. G. Artjushenko [et al.] // J. Lightwave Technology. — 1986. — Vol. 4, № 4. — P. 461-465.
13. Optical losses in polycrystalline thallium halide fibres at CO- and CO<sub>2</sub>-laser wavelengths / V. G. Artjushenko [et al.] // Electronics letters. — 1984. — Vol. 20, № 2. — P. 94-94.
14. Optical properties of mixed silver halide crystals and fibers / L. Nagli [et al.] // Journal of applied physics. — 1993. — Vol. 74, № 9. — P. 5737-5740.
15. Absorption edges of mixed silver-halide crystals and polycrystalline optical fibers / N. Barkay [et al.] // Applied physics letters. — 1989. — Vol. 54, № 12. — P. 1083-1085.
16. Silver halide single-mode fibers for the middle infrared / S. Shalem [et al.] // Appl. Phys. Lett. — 2005. — Vol. 87. — P. 091103.
17. Barklay, N. Elasticity of mixed silver-halide polycrystalline optical fibers / N. Barklay, A. Katzir // Appl. Phys. — 1993. — Vol. 74, № 4. — P. 2980-2982.
18. Mechanical properties of mixed silver-halide crystals and polycrystalline optical fibers / N. Barkay [et al.] // J. Appl. Phys. — 1988. — Vol. 54, № 10. — P. 5256-5258.
19. Barkay, N. High-cycle fatigue of silver halide infrared fibers / N. Barkay, A. German, A. Katzir // Applied optics. — 1994. — V. 33, № 13. — P. 2734-2736.
20. Barkay, N. Mechanical fatigue monitoring using absorption spectroscopy of infrared fibers / N. Barkay, A. Katzir // Appl. Phys. Lett. — 1993. — Vol. 63, № 13. — P. 1762-1764.
21. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. — Москва : Издательство стандартов, 2005. — 13 с.

### СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ИК-СВЕТОВОДОВ

В высокопрозрачных твердых материалах затухание света обуславливается тремя независимыми процессами: электронным поглощением, рэлеевским рассеянием света и колебательным поглощением [1]. Рассеяние Рэля определяет затухание излучения в более длинноволновом диапазоне. Оно возникает из-за непостоянства показателя преломления вещества, обусловленного флуктуациями его плотности, а также составом, и быстро падает с увеличением длины волны излучения, кроме того, также зависит от качества поверхности световодов. Существует определенная зависимость поглощения электромагнитного излучения от размера зерен и состава поликристаллического материала.

#### 6.1. Спектральный диапазон прозрачности ИК-световодов

Внешний вид инфракрасных световодов на основе галогенидов серебра и таллия представлен на рис. 6.1, 6.2. Внутренняя структура двухслойного инфракрасного многомодового световода приведена на рис. 6.3, из которого видно, что методом экструзии удаётся достичь равномерности диаметра сердцевины по длине и сечению световода с отклонением от заданного на величину менее 0,8 %.

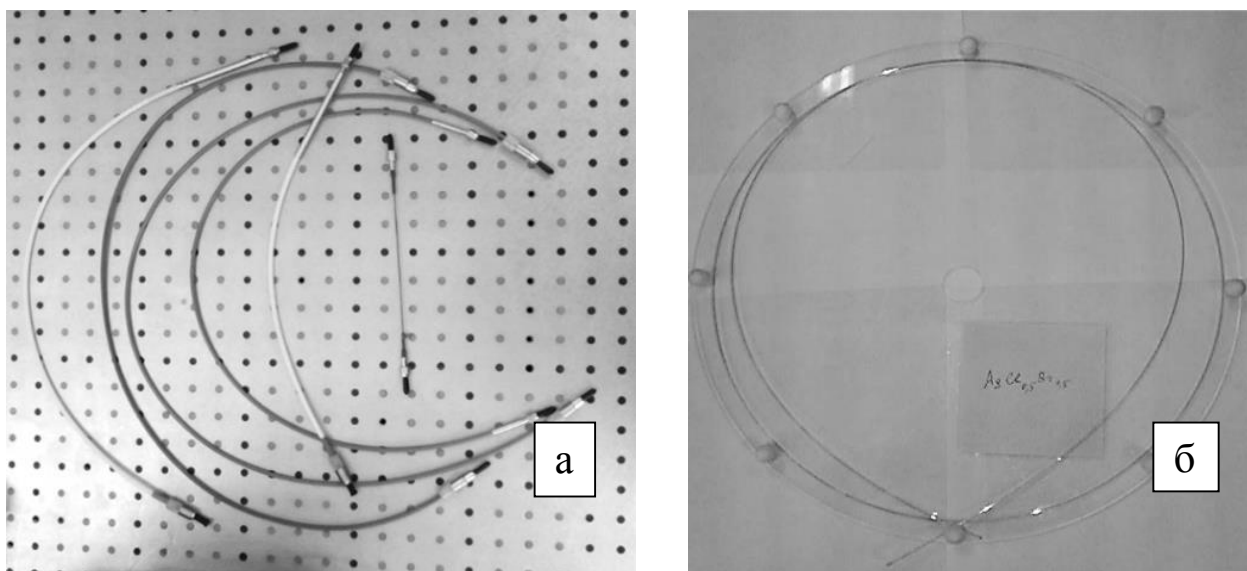


Рис.6.1. Внешний вид ИК-световодов: во фторопластовой защитной оболочке и оконцованных коннекторами SMA 905 (а); без защитной оболочки (б)

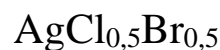
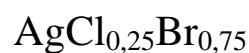
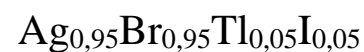
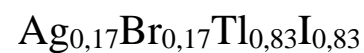
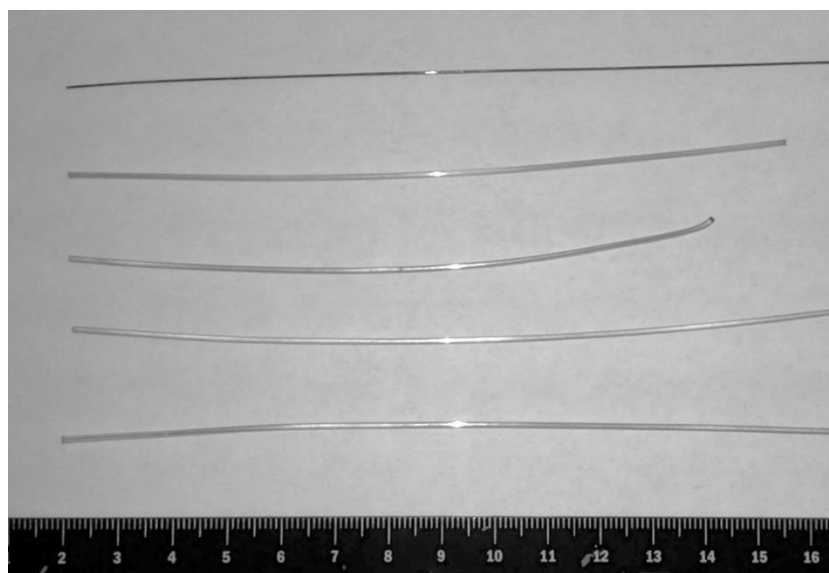


Рис. 6.2. Внешний вид ИК-световодов различного состава

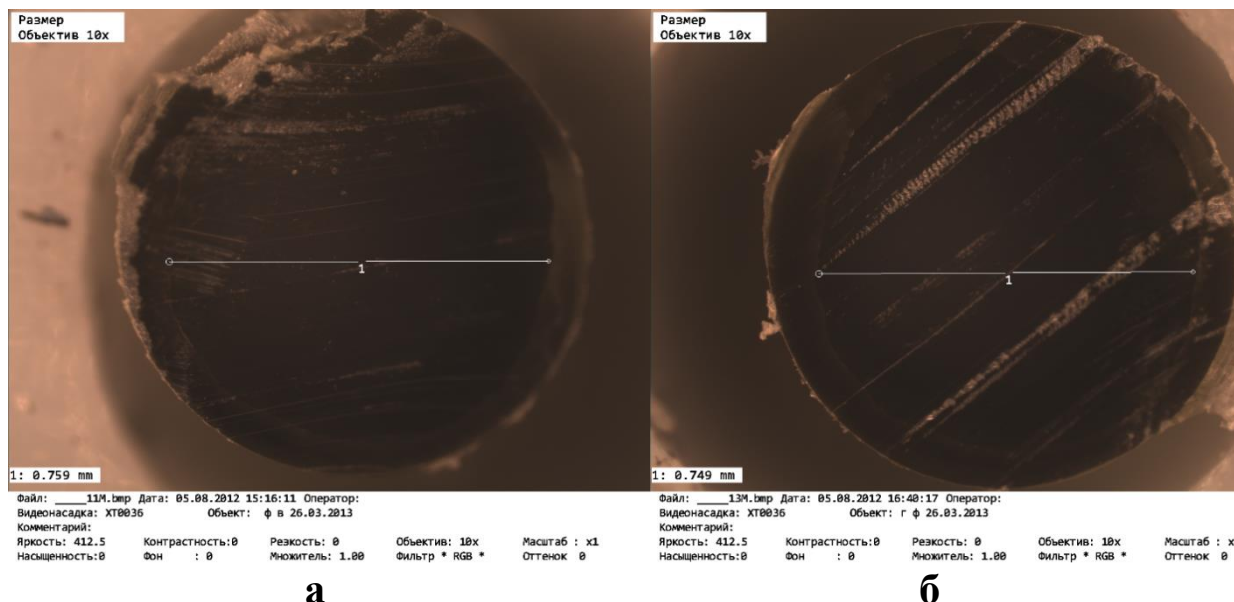


Рис. 6.3. Контроль геометрической однородности сердцевины в двухслойном ИК-световоде длиной 2 м, наружный диаметр 900 мкм, диаметр сердцевины 755 мкм, состав оболочки –  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$ , состав сердцевины –  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ : входной торец (а); выходной торец (б)

Спектральное пропускание и оптические потери однослойных световодов, оконцованных с двух сторон, диаметром 1,12 мм представлены на рис. 6.4 и 6.5. Среднее значение оптического пропускания для ИК-световода длиной 1 м составило 75 %. Для измерения спектров применяются инфракрасные спектрометры. Измерения галогенидсеребряных инфракрасных световодов, представленных на рис. 6.4 и 6.5, проводилось на ИК-Фурье-спектрометре IR Prestige-21 по схеме, представленной на рис. 6.6.

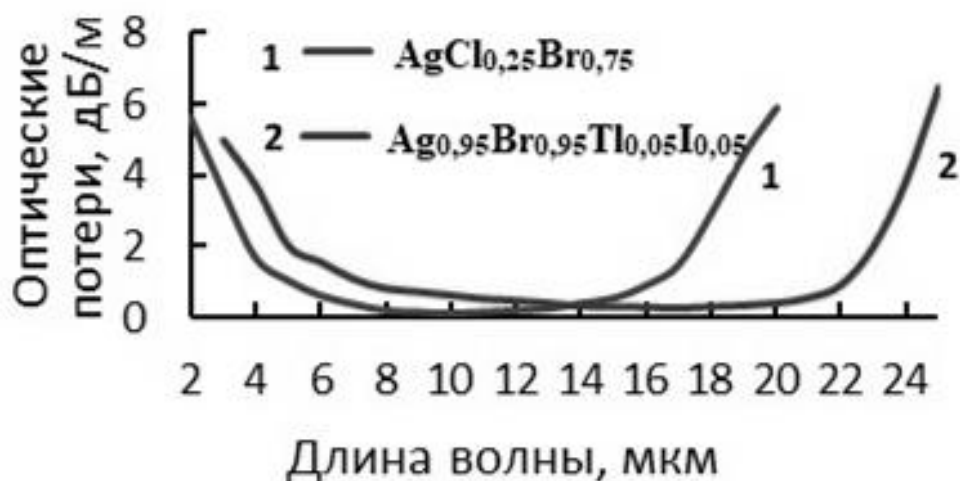


Рис. 6.4. Оптические потери в ИК-световодах состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ , и  $\text{Ag}_{0,95}\text{Br}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{I}_{0,05}$  длиной 2 м

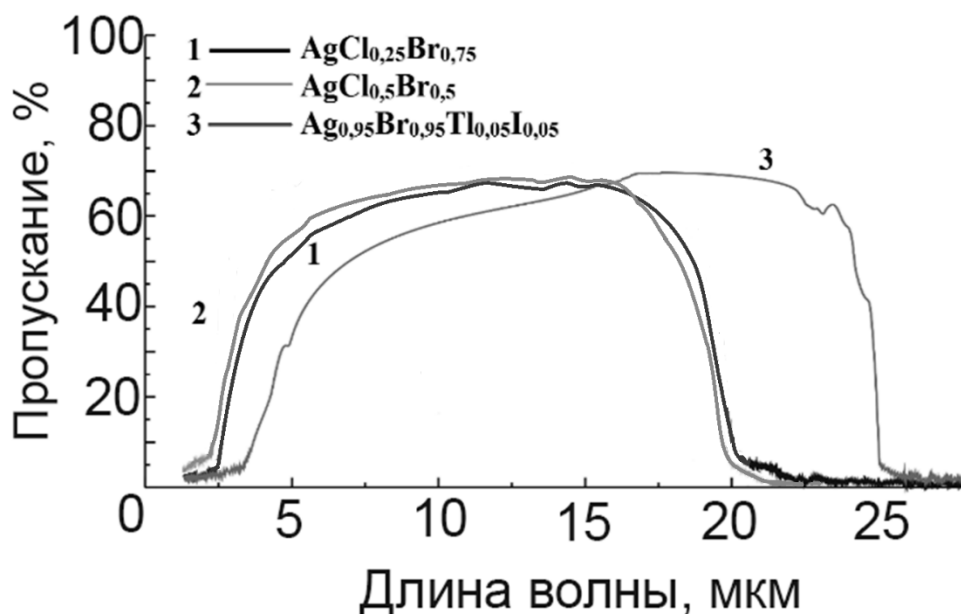


Рис. 6.5. Спектры пропускания световодов длиной 1 м  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ ,  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$  и  $\text{Ag}_{0,95}\text{Br}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{I}_{0,05}$  по схеме измерения, основанной на подключении оптического блока и тестового световода к ИК-спектрометру

Спектральный диапазон работы световодов составов  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  и  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$  лежит в области от 2,5 до 20 мкм, а световода состава  $\text{Ag}_{0,95}\text{Br}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{I}_{0,05}$  – в области от 3,5 до 25 мкм. Измерения проведены на ИК-Фурье спектрометре IRPrestige-21 с использованием DLATGS детектора, делителя KBr, диапазон работы – от 1,28 до 28,6 мкм, 20 сканов, разрешение  $4\text{ см}^{-1}$ . Для ввода ИК-излучения в исследуемый световод использовалась специальная приставка с параболическими внеосевыми зеркалами и возможностью юстировки торцов световода. При съемке фона (BKG) необходимо использовать тестовый световод для замыкания оптического канала прибора. В качестве



тестовых световодов использовались волокна соответствующих составов  $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$ ,  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  и  $\text{Ag}_{0,95}\text{Br}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{I}_{0,05}$  (см. рис. 6.6).

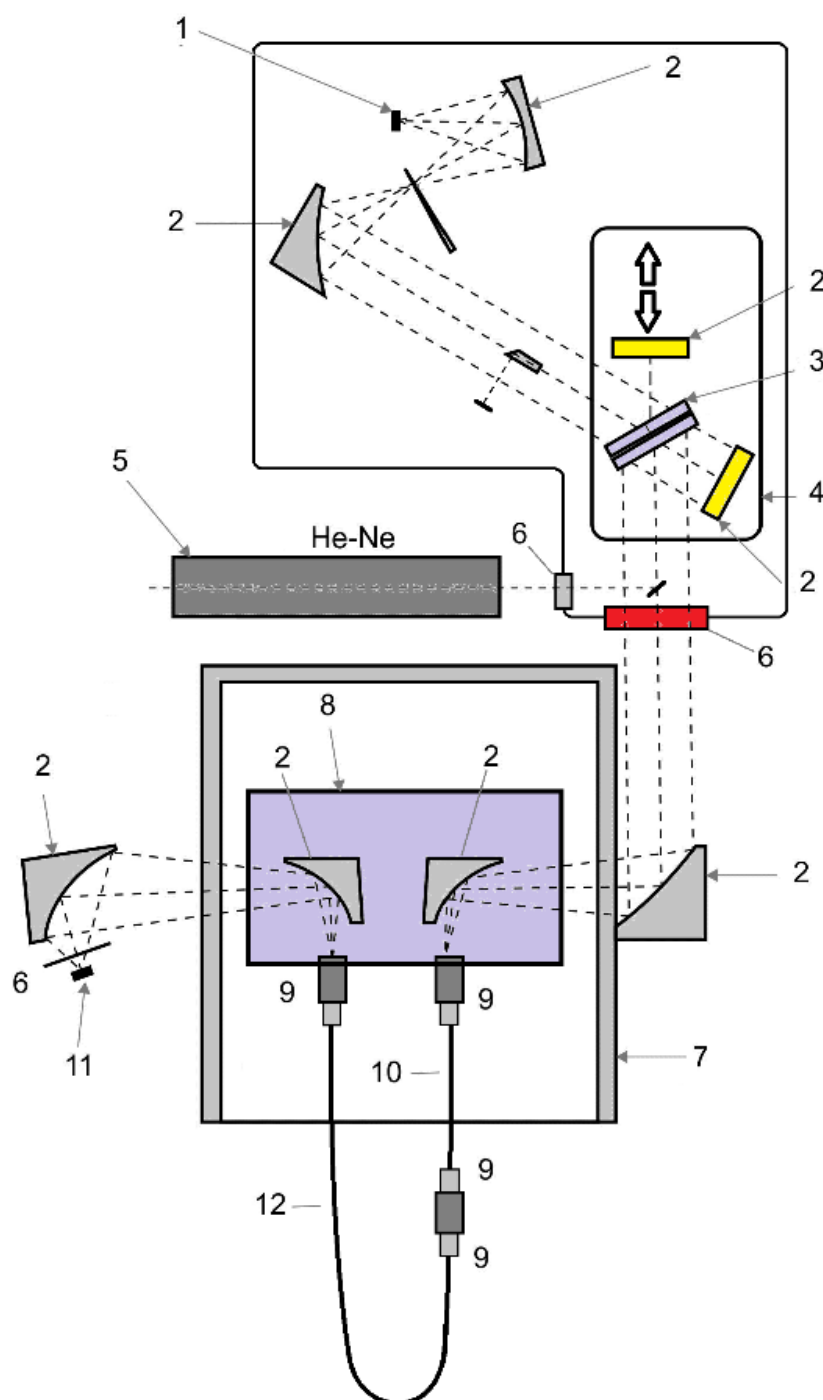


Рис. 6.6. Схема измерения спектров пропускания ИК-световодов на ИК-Фурье-спектрометре IR-Prestige 21 с волоконным блоком подключения:  
 1 – источник ИК-излучения; 2 – зеркала; 3 – светоделитель; 4 – блок интерферометра Майкельсона; 5 – He-Ne-лазер; 6 – оптические окна;  
 7 – кюветное отделение; 8 – волоконный блок подключения; 9 – оптические SMA-разъёмы; 10 – замыкающее (тестовое) волокно; 11 – приёмник ИК-излучения; 12 – исследуемый ИК-световод

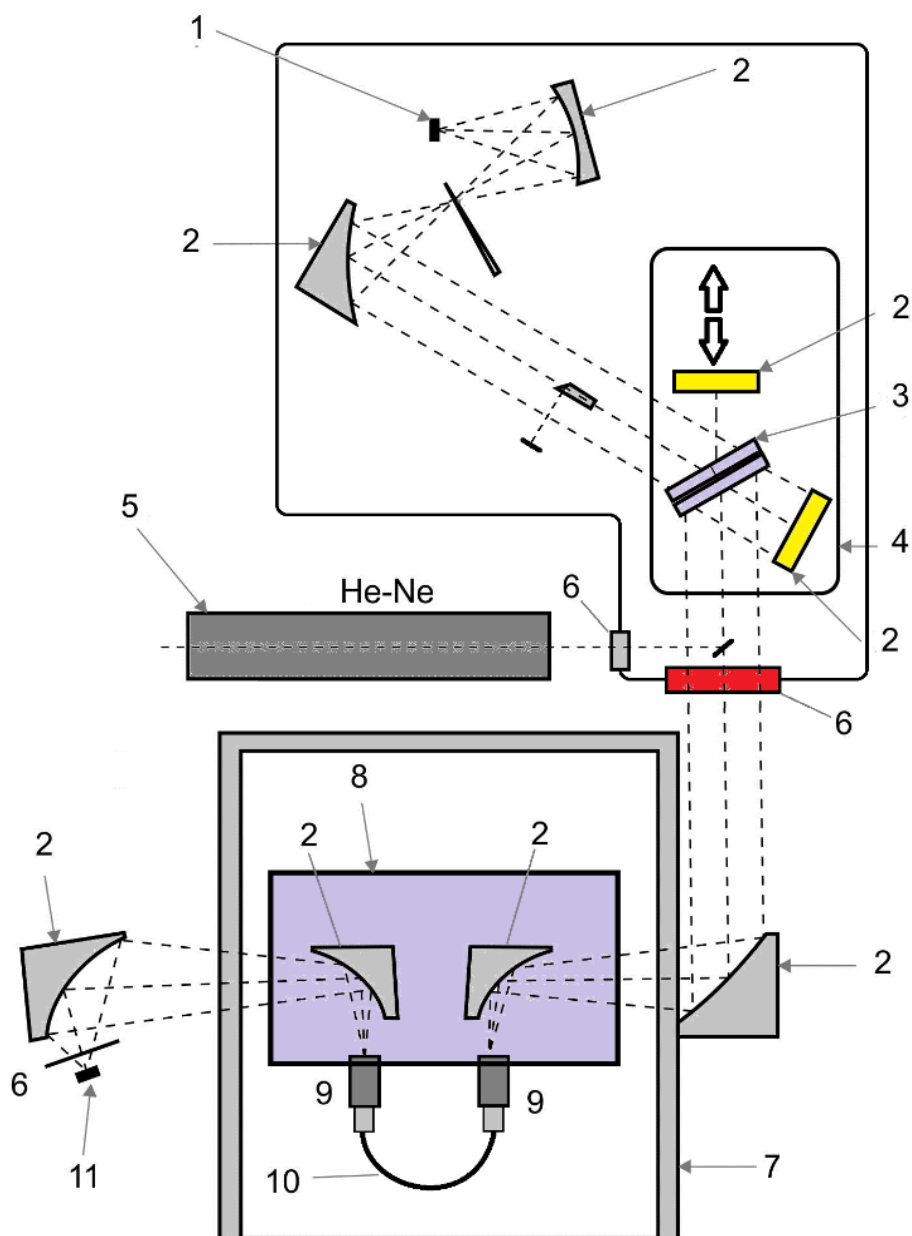


Рис. 6.7. Схема измерения спектров пропускания тестовых ИК-световодов на ИК-Фурье-спектрометре IR-Prestige 21 с волоконным блоком подключения:

- 1 – источник ИК излучения; 2 – зеркала; 3 – светоделитель; 4 – блок интерферометра Майкельсона; 5 – HeNe-лазер; 6 – оптические окна; 7 – кюветное отделение; 8 – волоконный блок подключения; 9 – оптические SMA-разъёмы; 10 – замыкающее (тестовое) волокно в режиме ВКГ; 11 – приёмник ИК излучения

Спектры световодов составов  $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$  и  $\text{Ag}_{0.95}\text{Br}_{0.95}\text{Tl}_{0.05}\text{I}_{0.05}$  представлены на рис. 6.8 и 6.9 и измерены без использования тестового замыкающего световода по схеме, изображённой на рис. 6.7. Следует отметить, что по данной схеме измерения (режим фона) можно снять спектральные характеристики тестовых и исследуемых световодов. Данные спектры качественно выглядят одинаково, а отличаются лишь

по уровню прошедшей энергии в зависимости от длины и диаметра световода.

Из приведённых спектров явно видна связь между составами световодов и диапазоном пропускания. В частности, содержание более тяжёлого по молекулярной массе Тl в AgBr сдвигает правый край поглощения до 25 мкм для световодов состава 5 мол.% Тl в AgBr. Данный вывод полностью совпадает с заключением о расширении спектрального диапазона в сторону больших длин волн для кристаллов систем AgBr – (TlBr<sub>0,46</sub>I<sub>0,54</sub>) и AgBr – Тl.

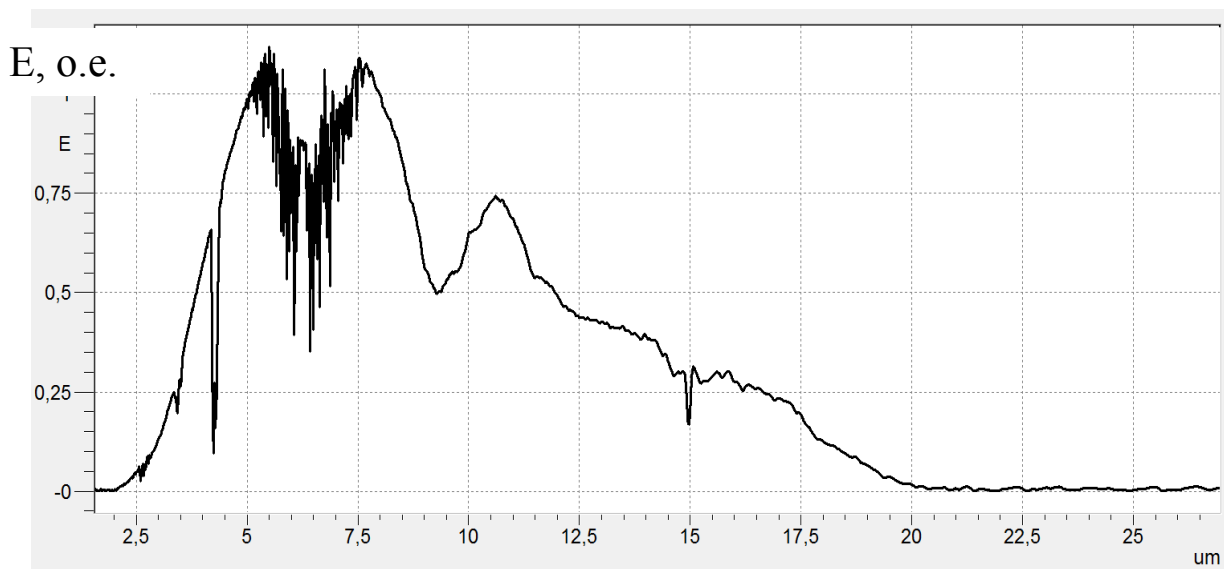


Рис.6.8. Спектр в режиме фона (ВКГ) световода состава AgCl<sub>0,25</sub>Br<sub>0,75</sub>

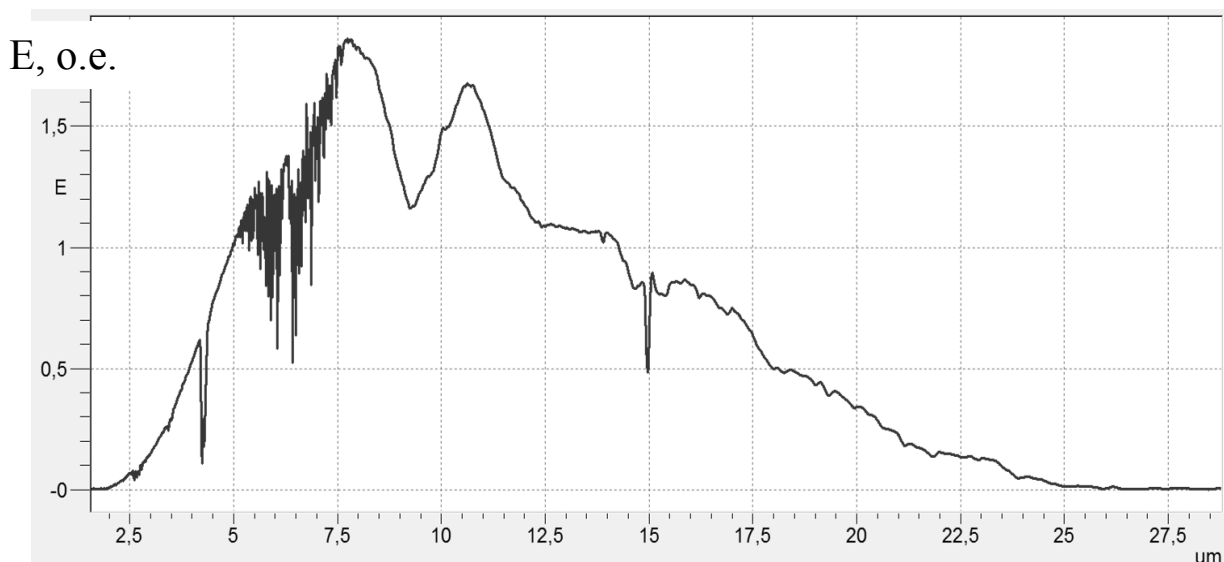


Рис. 6.9. Спектр в режиме фона (ВКГ) световода состава Ag<sub>0,95</sub>Br<sub>0,95</sub>Tl<sub>0,05</sub>I<sub>0,05</sub>

Следует отметить наличие зависимости значения коротковолнового края поглощения от длины световода. Например, для световода состава AgCl<sub>0,25</sub>Br<sub>0,75</sub> при длине 180 мм и диаметре 1,12 мм диапазон

прозрачности начинается от 1,8 мкм, а при длине 1 м – от 2,4 мкм (рис. 6. 8, рис. 6. 10).

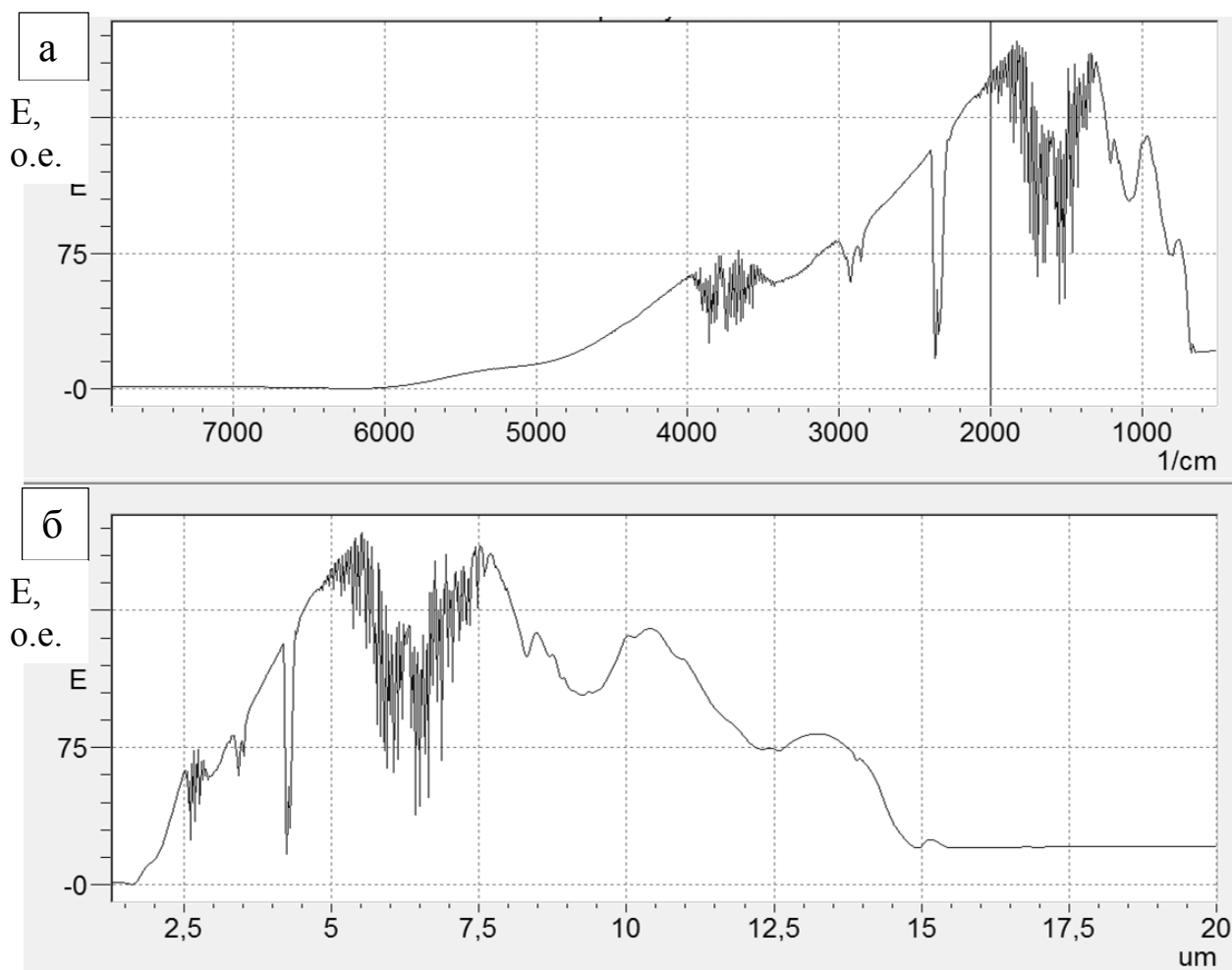


Рис. 6.10. Спектр в режиме фона (ВКГ) световода состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  длиной 180 мм при использовании КРТ-детектора (ограничивает спектральный диапазон до 15 мкм); ось абсцисс: а –  $\text{см}^{-1}$ ; б – мкм

## 6.2. Оптические потери, плотность мощности передаваемого ИК-излучения, влияние радиуса изгиба на оптические потери

Для галогенидсеребряных волокон измерение оптических потерь проводится на специальном стенде с использованием  $\text{CO}_2$ -лазера Synrad 10 Вт и термоэлектрического приемника Ophir на длине волны 10,6 мкм (рис. 6.11) [2, 3]. Расчет производится методом отрезков по формуле

$$\alpha = \frac{10 \lg(P_2/P_1)}{(l_2 - l_1)}, \quad (6.1)$$

где  $P_2$  и  $P_1$  – мощности излучения (мВт) на выходе из световода длиной  $l_2$  и отрезанного от него световода длиной  $l_1$  соответственно. Оптические потери ( $\alpha$ , дБ/м) измеряли во всех получаемых

ИК-световодах указанным выше способом. Они имеют значения от 0,1 и менее до 0,4 дБ/м в зависимости от составов световодов на длине волны 10,6 мкм.

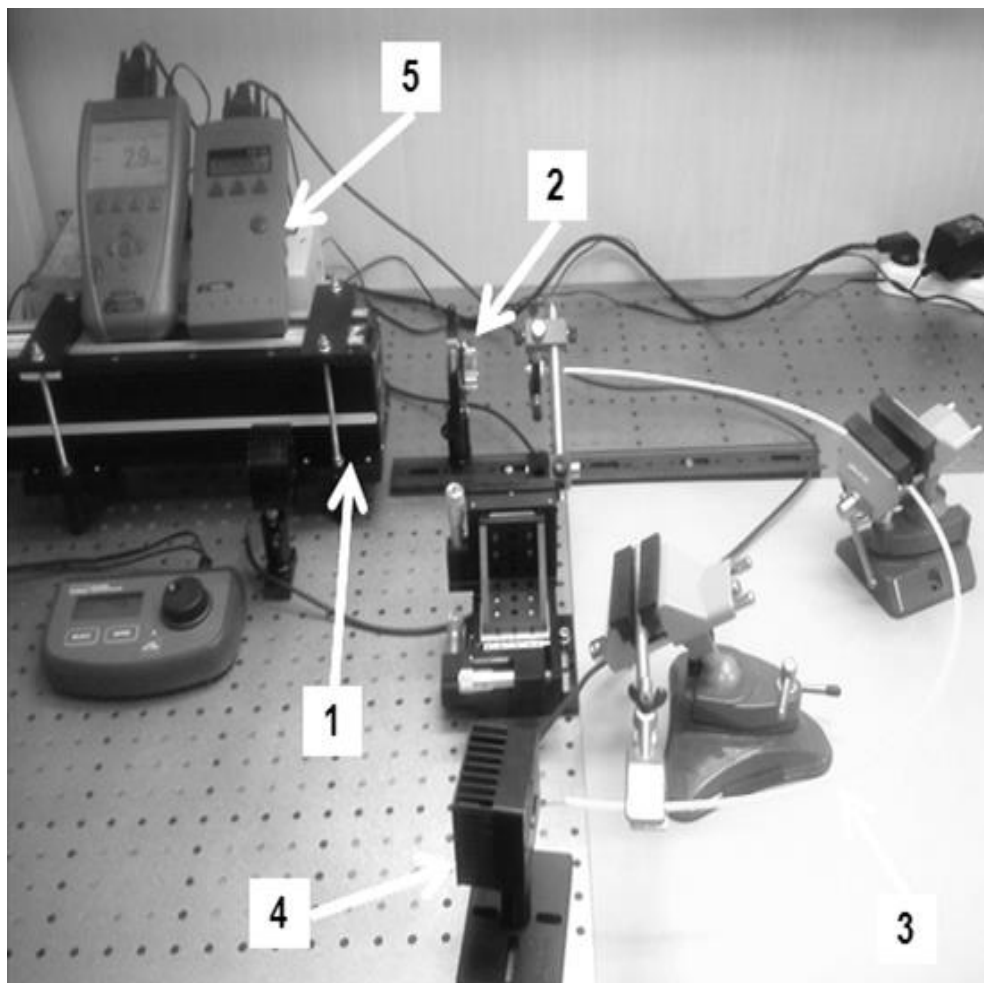


Рис. 6.11. Стенд для измерений оптических потерь в волокне:  
1 – CO<sub>2</sub>-лазер; 2 – ZnSe-линза; 3 – ИК-волокно; 4 – термоэлектрический датчик; 5 – дисплеи термоэлектрических датчиков

Используя стенд на рис. 6.12, оцениваем лучевую прочность ИК-световода состава AgCl<sub>0,25</sub>Br<sub>0,75</sub> диаметром 1,12 мм, длиной 1 м, которая составляет более 60 кВт/см<sup>2</sup> на длине волны 10,6 мкм в непрерывном режиме. Данный показатель позволяет обеспечить передачу по оптическому волокну излучения стандартных медицинских лазеров мощностью 10–30 Вт. Максимальная мощность вводимого излучения в непрерывном режиме составила 21,1 Вт.

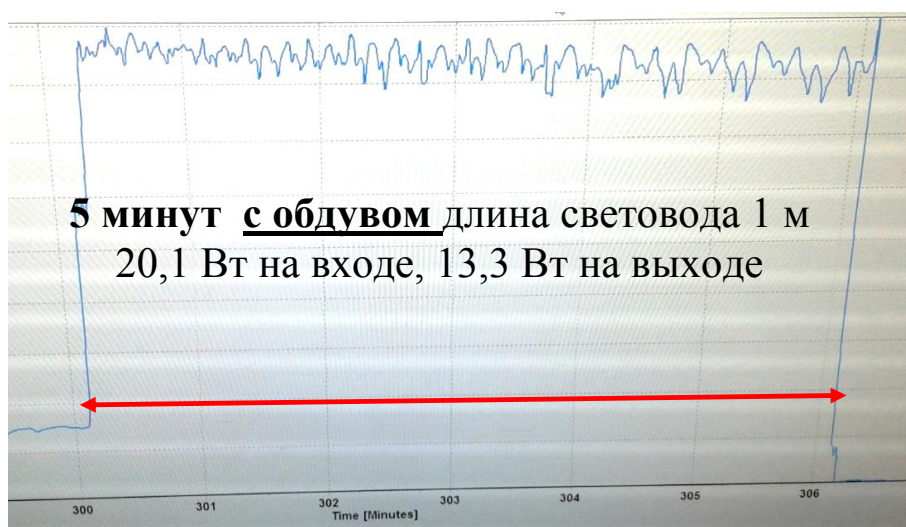
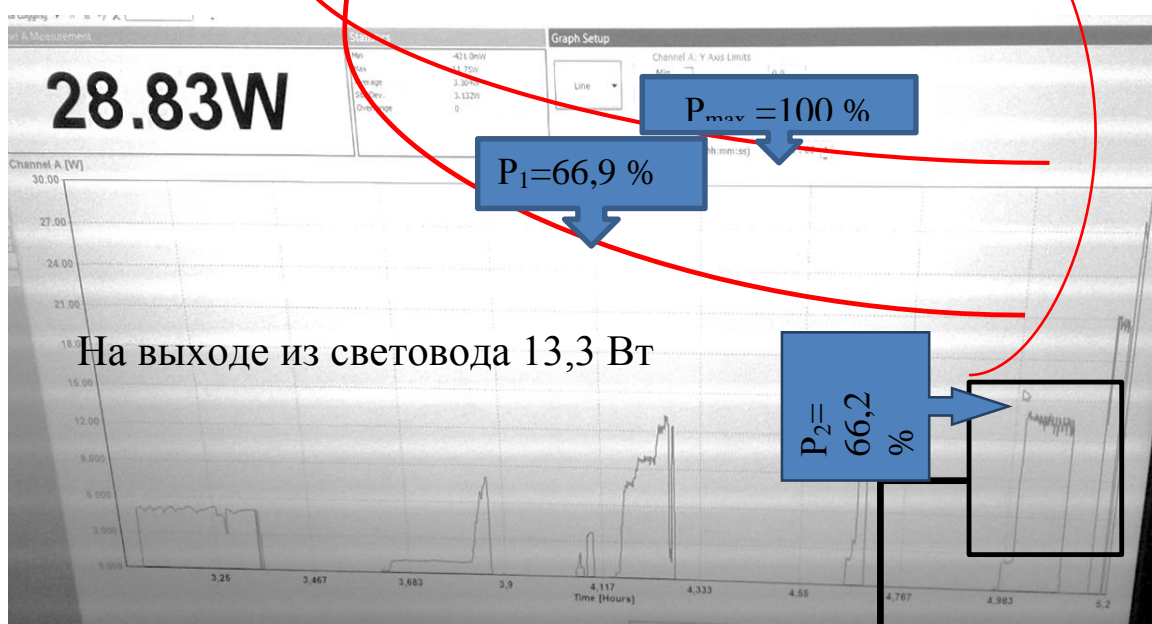
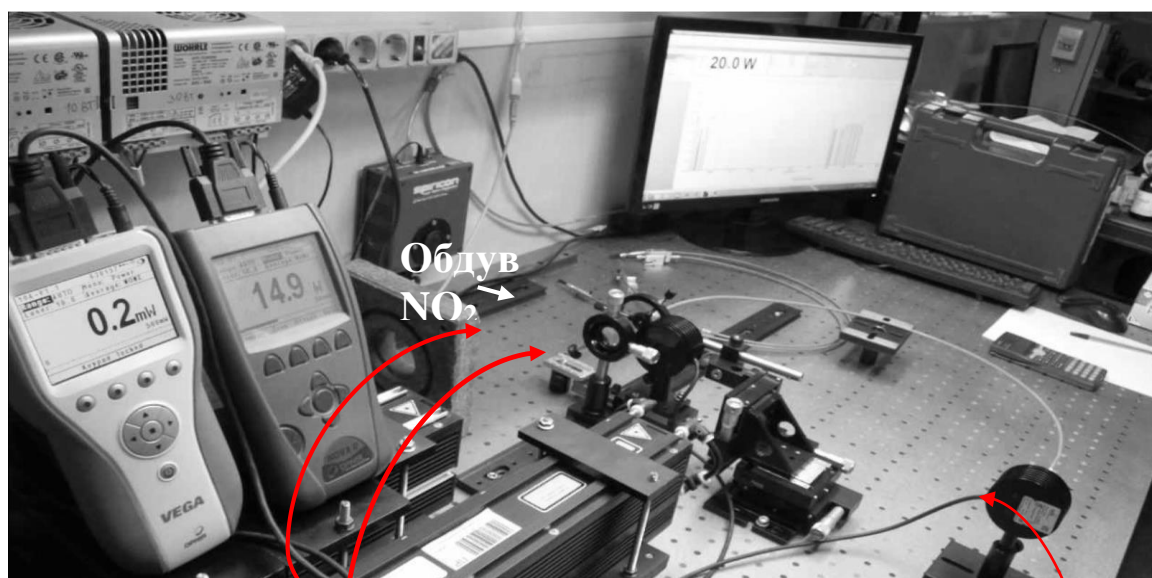


Рис.6.12. Испытание стойкости оптического волокна к лазерному излучению при охлаждении газообразным азотом марки ОСЧ



При передаче лазерного излучения ( $\lambda = 10,6$  мкм, плотность мощности 61 кВт/см<sup>2</sup>) по волокну в непрерывном режиме и в течение 36 ч оптические свойства световода (потери) не изменились. Внешний вид торца световода после испытания представлен на рис. 6.13. Для оценки ввода излучения использовалась ZnSe-линза диаметром 24,5 мм с фокусным расстоянием 50 мм и диаметром фокусного пятна 220 мкм. Диаметр фокусного пятна оценивался методом сканирования оптической щелью перетяжки излучения.

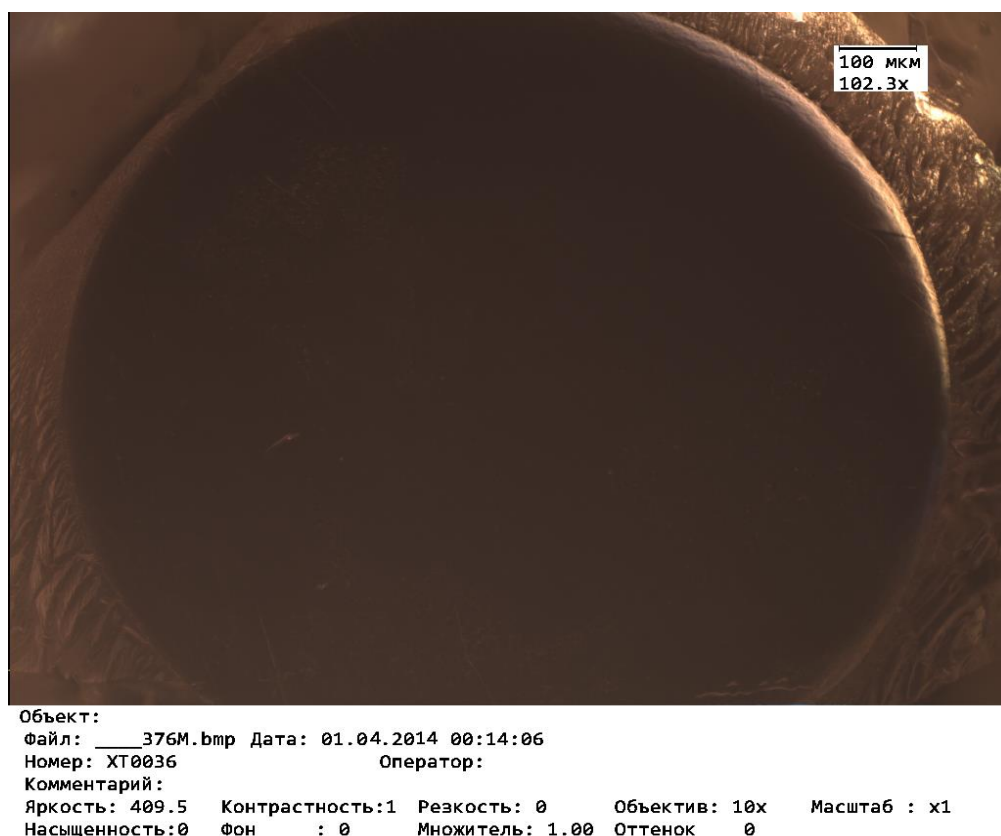


Рис. 6.13. Входной торец световода после воздействия излучения мощностью 20,1 Вт (пиковая 21,1 Вт), плотность мощности 61 кВт/см<sup>2</sup>

При передаче излучения большой мощности была установлена необходимость охлаждения торца световода для введения максимальной мощности и увеличения длительности воздействия лазерного излучения. Для охлаждения был использован азот газообразный особой чистоты 1-го класса по ГОСТ 9293-74. Применение газа для охлаждения, помимо задачи теплоотвода от торца волокна, решает задачу защиты от возможного попадания пыли (см. рис. 6.12). Попадание инородных тел, поглощающих ИК-излучение, на торец волокна во время ввода лазерного излучения провоцирует образование центров нагрева материала и его расплавление. Данный факт необходимо будет учитывать при проектировании корпуса лазерного скальпеля и для других применений в силовой лазерной технике.

Была дана оценка влияния радиусов изгиба в 100 мм на оптические свойства волокон диаметром 1,12, 0,90 и 0,52 мм. Для эксперимента подготовили отрезки волокон длиной 1 м. Проводили изгиб световодов через центр на барабане диаметром 200 мм, предварительно измерив их оптические свойства (диапазон и интенсивность пропускания). Угол изгиба составлял  $90^\circ$ , количество изгибов – 100 раз в каждую сторону, при этом изменений в оптических свойствах не обнаружено.

### 6.3. Исследование пространственного распределения мод, вытекающих из ИК-световодов, в дальнем поле

Типичные картины распределения излучения в дальнем поле многомодовых световодов и одномодовых лазеров представлены на рис. 6.14.

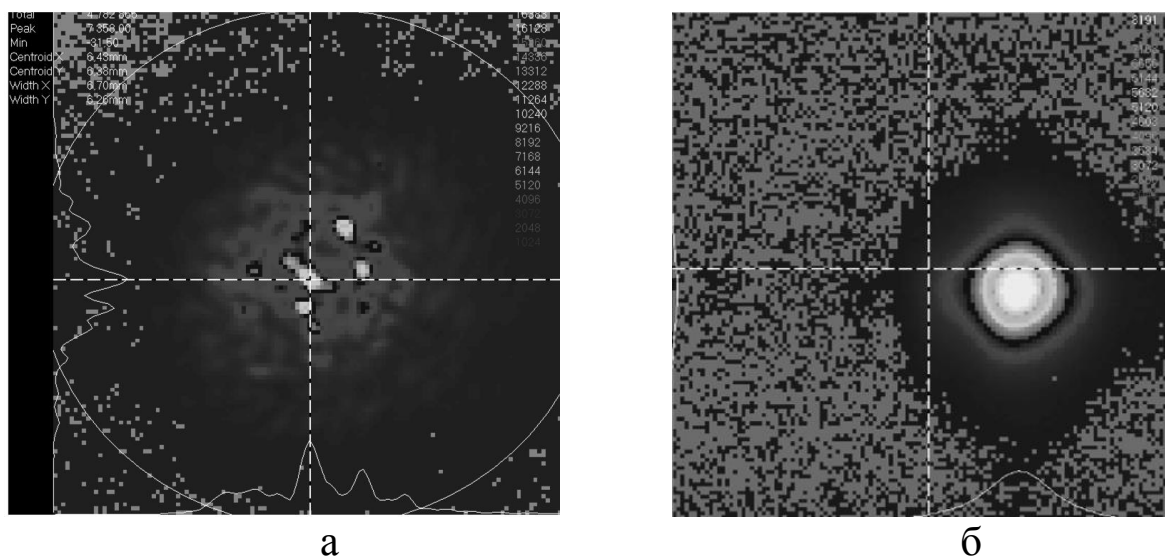


Рис. 6.14. Распределение энергии излучения по многомодовому ИК-световоду (сердцевина состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ , диаметр 450 мкм, оболочка состава  $\text{AgCl}_{0,30}\text{Br}_{0,70}$ ) на расстоянии 15 мм от выходного торца при вводе в него одномодового излучения  $\text{CO}_2$ -лазера (а); одномодовое излучение  $\text{CO}_2$  лазера (б). Изображения получены с помощью CCD-камеры SPIRICON PYROCAM III

Из рис. 6.14 явно видно, что исходное одномодовое излучение  $\text{CO}_2$ -лазера претерпевает в многомодовом световоде существенные изменения и происходит ухудшение качества испускаемого пучка. Поэтому одной из задач являлось получить одномодовый световод с увеличенным полем моды, так как без увеличения поля моды одномодовый световод для работы на длине волны 10,6 мкм имеет достаточно малую сердцевину, диаметром  $\sim 30$  мкм при  $\Delta n 0,01$ . Уменьшение  $\Delta n$



трудно осуществимо на практике для галогенидов серебра системы  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ . Поэтому при увеличенном диаметре сердцевины одномодового световода можно, во-первых, значительно легче заводить в сердцевину излучение и, во-вторых, передавать энергию большей мощности. Например, при подтверждённой нами на опыте плотности мощности  $61 \text{ кВт/см}^2$  для галогенидов серебра в сердцевину диаметром  $30 \text{ мкм}$  удаётся ввести  $0,43 \text{ Вт}$ , а в сердцевину диаметром  $100 \text{ мкм}$  –  $4,78 \text{ Вт}$ .

### 6.3.1. Одномодовые фотонно-кристаллические ИК-световоды

Изготовлено одномодовое фотонно-кристаллическое волокно с расширенным полем фундаментальной моды следующей геометрии профиля сердцевины: шесть периферических вставок расположены вокруг одной центральной вставки. Диаметр всех вставок составлял  $11,1 \text{ мкм}$  с шагом  $55,5 \text{ мкм}$ . Составы твёрдых растворов, мол. %: в матрице  $\text{AgBr} = 82 \%$ ,  $\text{AgCl} = 18 \%$ ; во вставках периферии  $\text{AgBr} = 75 \%$ ,  $\text{AgCl} = 25\%$ ; в центральной вставке  $\text{AgBr} = 84 \%$ ,  $\text{AgCl} = 16\%$ . Показатели преломления световодов представлены в табл. 6.1.

Одномодовый режим наряду с расширением поля моды может быть обеспечен по всей длине волокна только при сохранении спроектированного профиля. Для востребованных применений оптическое волокно должно иметь длину  $1\text{--}2 \text{ м}$ . В связи с этим изготавливались волокна длиной  $2\text{--}2,5 \text{ м}$ , которые делили на равные отрезки длиной  $0,2 \text{ м}$  с целью контроля поперечного профиля (рис. 6.15).

Исследование одномодового режима выполнялось на оптическом стенде, схема которого представлена на рис. 6.16. На рис. 6.17 и рис. 6.18 показаны 2D- и 3D-картины распределения излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, вводимого и выводимого из световода, с увеличенным диаметром поля моды длиной  $1 \text{ м}$ .

В табл. 6.2 представлены теоретически рассчитанные и экспериментально подтверждённые характеристики изготовленного нами фотонно-кристаллического световода с периферическими вставками, расположенными в гексагональном порядке (Hex AC ФКС): диаметр вставки  $d_i$ , шаг структуры  $\Lambda_i$ , коэффициент затухания  $\alpha$  и половинный угол расхождения пучка  $\gamma_{1/2}$ .

Таблица 6.1

Зависимость величины показателей преломления  $n$  от состава материала световода и длины волны

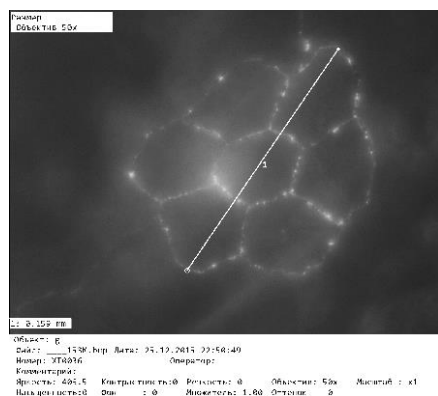
Состав световода, мол. %	$n$ на краю по- глощения при $\lambda$ [нм]	$n$ на длине волны He-Ne- лазера (632,8 нм)	$n$ при $\lambda \approx 1$ мкм	$n$ на длине волны CO <sub>2</sub> - лазера (10.6 мкм)
AgCl	2,353 400 нм	2,054	2,020 1,067 мкм	1,987
AgCl <sub>0,86</sub> Br <sub>0,14</sub>	2,393 428 нм	2,094	2,0370 1,088 мкм	1,997
AgCl <sub>0,60</sub> Br <sub>0,40</sub>	2,415 444 нм	2,144	2,100 1,080 мкм	2,055
AgCl <sub>0,25</sub> Br <sub>0,75</sub>	2,434 458 нм	2,211	2,188 1,086 мкм	2,122
AgCl <sub>0,18</sub> Br <sub>0,82</sub>	2,438 461 нм	2,214	2,187 1,083 мкм	2,130
AgBr	2,443 465 нм	2,247	2,207 1,075 мкм	2,166
Ag <sub>0,99</sub> Br <sub>0,99</sub> Tl <sub>0,01</sub> I <sub>0,01</sub>	2,448 469 нм	—	2,279 1,0926 мкм  2,323 1,0147 мкм  2,359 0,8947 мкм  2,383 0,7846 мкм  2,411 0,7413 мкм	2,173
Ag <sub>0,98</sub> Br <sub>0,98</sub> Tl <sub>0,02</sub> I <sub>0,02</sub>	2,465 482 нм	—	2,329 1,037 мкм	2,186
Ag <sub>0,95</sub> Br <sub>0,95</sub> Tl <sub>0,05</sub> I <sub>0,05</sub>	2,474 489 нм	—	2,383 1,039 мкм	2,239



а



б



в



г

Рис. 6.15. Контроль профиля поперечного сечения одномодового фотонно-кристаллического волокна: начальный профиль сечения (а); профиль сечения на расстоянии 0,6 м (б); профиль сечения на расстоянии 1,4 м (в); профиль сечения на расстоянии 2 м (г). Центральная вставка на данных снимках не видна из-за особенности настройки микроскопа

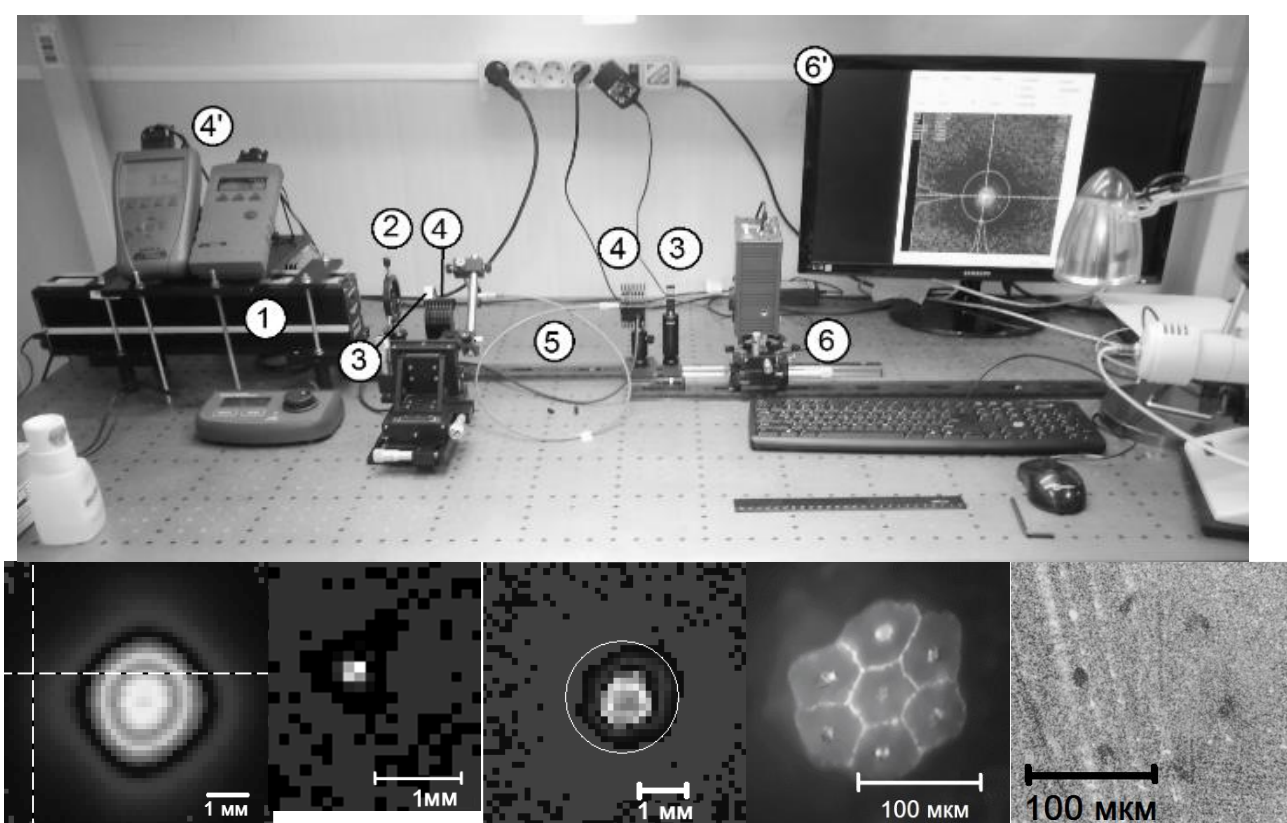
Таблица 6.2

Теоретически рассчитанные и экспериментально подтверждённые характеристики Нех АС ФКС

Характеристика	Теория	Эксперимент
$d_i$ [ $\mu\text{m}$ ]	11,1	$12 \pm 1^*$
$\Lambda_i$ [ $\mu\text{m}$ ]	55,5	$59 \pm 5^*$
$\alpha$ при $R = 10$ cm [dB/m]	$> 8$	$1,5^{**}$
$\gamma_{1/2}$ [ $^\circ$ ]	9,2	5,7

\* погрешность обусловлена методикой измерения и разбегом габаритов вставок, а границы интервала соответствуют значениям на разных торцах

\*\* рассматриваются собственные потери при радиусе изгиба волокна в 10 см



а б в г д  
 Рис. 6.16. Схема наблюдения модового состава в дальнем поле (вверху):  
 1 – CO<sub>2</sub>-лазер, 2 – настраиваемая диафрагма, 3 – ZnSe-линзы, 4 – термого-  
 ловки, 4' – дисплеи термоголовок, 5 – тестируемое волокно, 6 – ИК-камера  
 PYROCAM III, 6' – компьютерный контроль поля моды. Внизу изображены: а  
 – пучок  
 лазера (коэф. корреляции с гауссовским распределением 99,3 %); б – пучок  
 лазерного излучения после линзы (коэф. корреляции с гауссовским  
 распределением 89,1 %); в – пучок, исходящий из волокна (коэф. корреляции  
 с гауссовским распределением 92,4 %), г, д – входной торец  
 и выходной торец соответственно

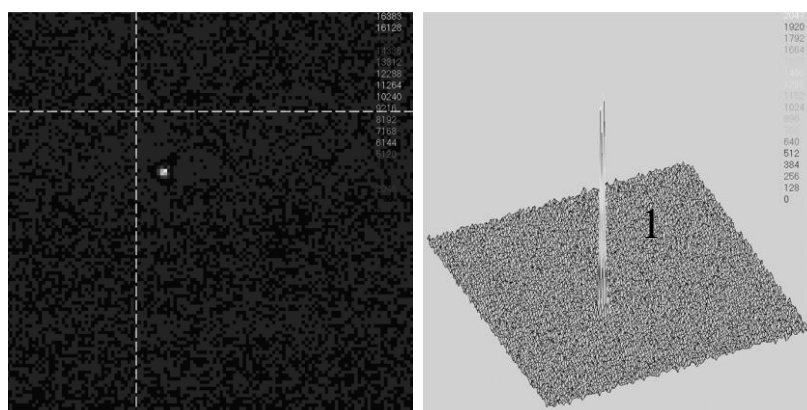


Рис.6.17. 2D- и 3D-изображения распределения излучения CO<sub>2</sub>-лазера  
 в фокусе ZnSe-линзы на длине волны 10,6 мкм

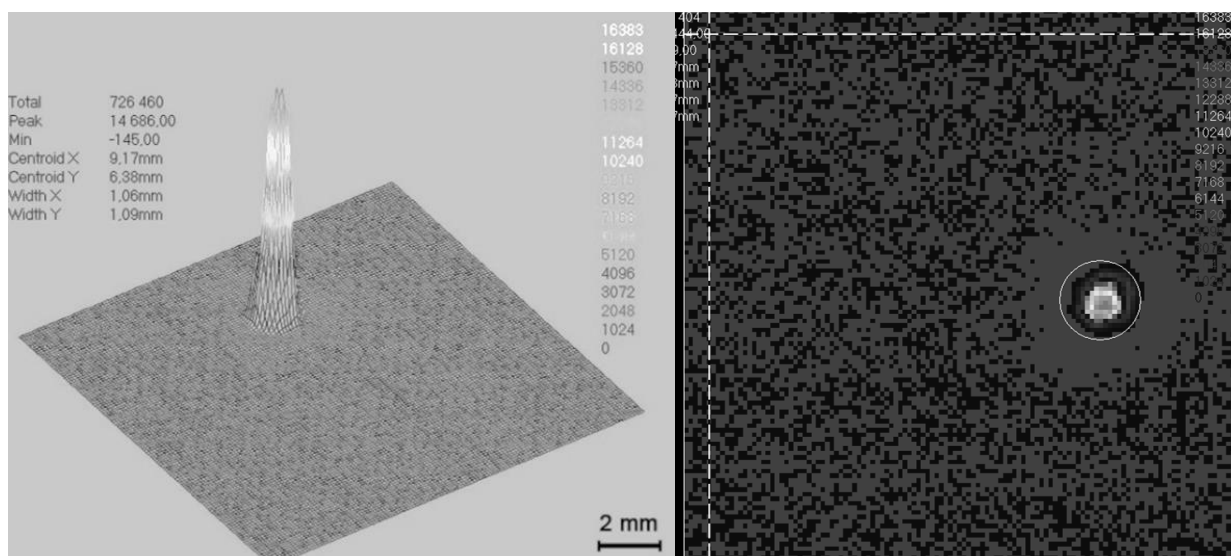


Рис. 6.18. 2D- и 3D- изображения распределения излучения, выходящего из одномодового инфракрасного волокна с расширенным диаметром поля моды для работы на длине волны 10,6 мкм

### 6.3.2. Профилирование торцов и боковой поверхности ИК-световодов

Для достижения необходимых в лазерной технике характеристик одномодового и многомодового излучения было проведено исследование по профилированию торцов и боковой поверхности ИК-световодов из галогенидов серебра.

Рассматриваемые кристаллы имеют показатель преломления от 1,98 до 2,2 для системы AgCl-AgBr в спектральном диапазоне от 0,8 до 10,6 мкм [4, 5]. Оптическое излучение выходит из световода под углом от 7 до 37° от оптической оси в зависимости от структуры и состава световода. Для разработки методики профилирования торцов волокон необходимо выполнить расчет во всем диапазоне возможных углов, составов и достичь размера диаметром фокусного пятна 0,1–0,5 мм на расстоянии 10,0–15,0 мм от выходного торца волокна.

Первым этапом являлось определение угла распространяющегося излучения в материале световода в зависимости от показателя преломления и угла выходящего излучения, результаты представлены в табл. 6.3. Рассматривались однослойные и двухслойные ИК-световоды.

Вторым этапом являлся расчет радиуса сферического торца в зависимости от угла распространения излучения в материале световода. Для получения фокусного расстояния F 10–15 мм в интервале внутренних углов от 3,03 до 17,7° при диаметре световодов d от 350 до 1100

мкм необходимо придать сферическую форму выходному торцу с радиусом кривизны  $R$  в интервале от 0,49 до 4,25 мм (табл. 6.4).

Таблица 6.3

Зависимость угла распространяющегося излучения от показателя преломления и угла выходящего излучения

Угол выходящего излучения, град	Показатель преломления материала				
	1,98	2,0	2,1	2,2	2,3
	Угол распространяющегося излучения в световоде, град				
7	3,528	3,493	3,326	3,175	3,037
10	5,031	4,980	4,743	4,527	4,329
13	6,523	6,458	6,149	5,868	5,612
16	8,002	7,921	7,542	7,197	6,883
19	9,464	9,368	8,918	8,510	8,137
20	9,947	9,846	9,373	8,943	8,551
25	12,324	12,199	11,609	11,075	10,588
28	13,715	13,576	12,918	12,321	11,777
31	15,077	14,922	14,197	13,539	12,939
34	16,404	16,236	15,443	14,724	14,071
37	17,694	17,512	16,653	15,875	15,168

Для придания сферической поверхности торцам световодов из галогенидов серебра известны методы механической обработки резцом [6]. Данная технология малоприспособна для профилирования световодов длиной 1,5–2 м. В связи с этим применяется комбинированная методика, совмещающая принципы полирования и травления материала. Полирование осуществляется с использованием специально изготовленной вогнутой вращающейся сферической поверхности с требуемым радиусом кривизны при поэтапном введении травителя для получения различных радиусов кривизны волокон диаметром 350–1100 мкм (рис. 6.19, б). В качестве травителя используются водные растворы тиосульфата натрия. Перед деформацией поверхности световод торцуется под углом  $90^\circ$  с использованием установки (рис. 6.19, а).

## Радиус кривизны торца световода R

Угол рас- странения излу- чения в свето- воде, град	F – 10 мм			F – 15 мм		
	d-350 мкм	d-500 мкм	d-1100 мкм	d-350 мкм	d-500 мкм	d-1100 мкм
	R торца световода, мм при n = 1,98					
3,50	1,24	1,69	3,11	1,30	1,79	3,46
5,00	1,05	1,44	2,72	1,09	1,51	2,98
8,00	0,81	1,13	2,20	0,83	1,16	2,35
13,70	0,57	0,80	1,66	0,58	0,80	1,73
17,70	0,49	0,69	1,50	0,49	0,70	1,50
	R торца световода, мм при n = 2,0					
3,50	1,26	1,71	3,15	1,31	1,81	3,49
6,40	0,93	1,28	2,48	0,96	1,34	2,68
9,80	0,72	1,01	2,01	0,74	1,04	2,13
13,50	0,59	0,83	1,70	0,60	0,85	1,77
17,50	0,50	0,71	1,48	0,51	0,72	1,52
	R торца световода, мм при n = 2,1					
3,30	1,36	1,84	3,40	1,41	1,95	3,77
6,10	1,02	1,40	2,7	1,05	1,46	2,92
9,30	0,80	1,11	2,21	0,81	1,15	2,35
12,90	0,65	0,91	1,86	0,66	0,94	1,95
16,60	0,55	0,78	1,63	0,56	0,8	1,68
	R торца световода, мм при n = 2,2					
3,20	1,40	1,95	3,62	1,49	2,06	4,00
5,80	1,10	1,52	2,93	1,13	1,58	3,17
8,90	0,87	1,21	2,4	0,89	1,25	2,56
12,30	0,71	1	2,04	0,72	1,03	2,13
15,87	0,61	0,85	1,77	0,61	0,87	1,84
	R торца световода, мм при n = 2,30					
3,03	1,52	2,08	3,80	1,58	2,19	4,25
5,60	1,17	1,62	3,13	1,21	1,69	3,38
8,15	0,96	1,34	2,65	0,99	1,38	2,83
11,70	0,78	1,09	2,21	0,79	1,12	2,32
15,20	0,66	0,93	1,92	0,67	0,95	2,00

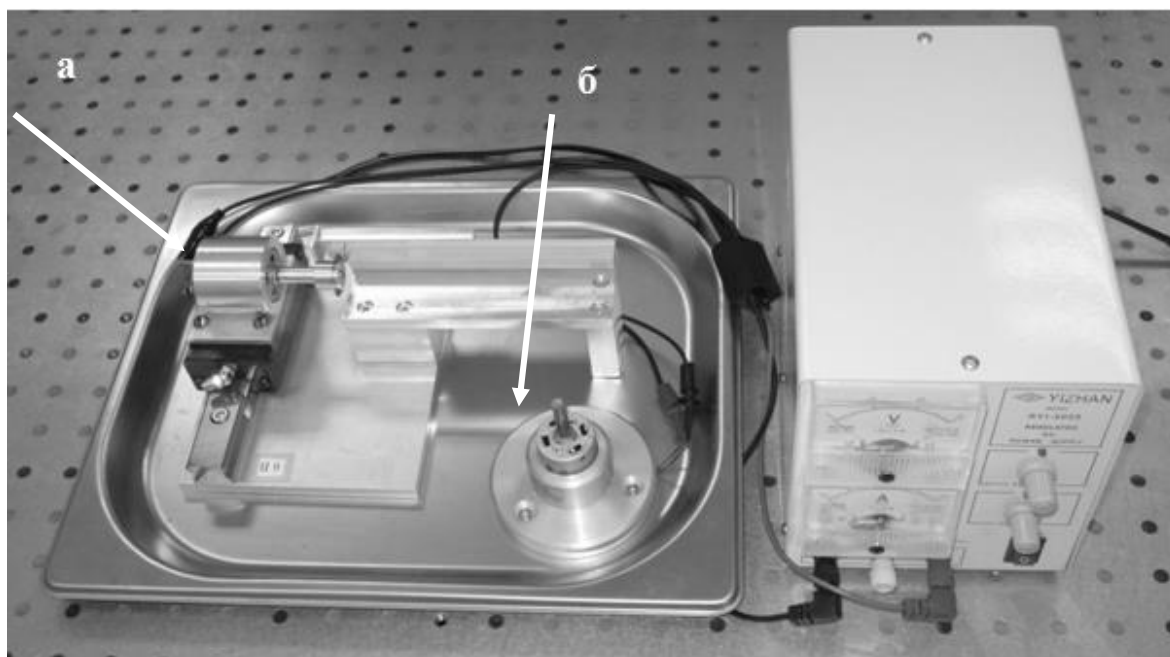


Рис. 6.19. Общий вид станда для профилирования световодов: установка для торцевания ИК-световодов (а); устройство для профилирования сферических торцов световодов (б)

В процессе профилирования геометрия контролируется оптическим микроскопом при увеличении  $\times 100$ – $\times 200$  (рис. 6.20, рис. 6.21).

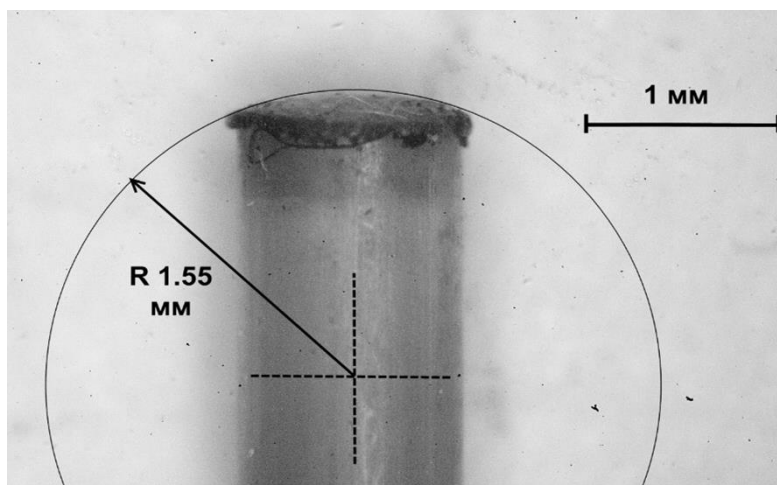
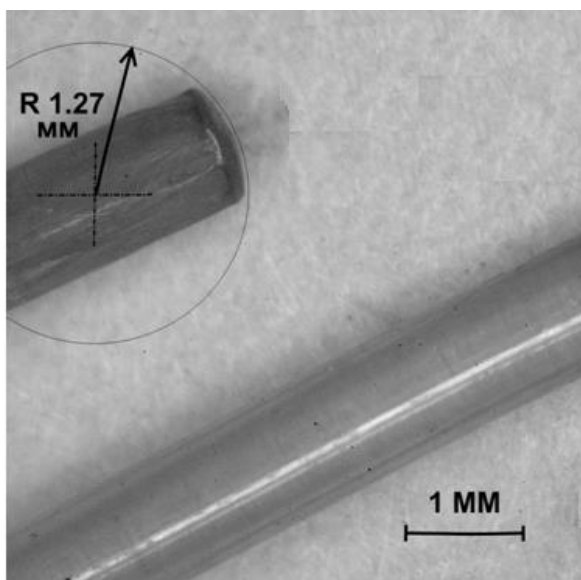


Рис. 6.20. Профилированный торец световода в процессе придания сферической поверхности

Разработана и испытана методика плавного изменения диаметра путем постепенного стравливания световода. Состав травителя – водный раствор тиосульфата натрия (могут применяться и другие травители). Подъем световода осуществляется со скоростью 0,4–0,8 мм/мин, путь световода в травителе составляет 10–50 мм с точностью 1 мкм, для подъема используется испытательная машина AG-100 (Shimadzu). График зависимости хода от времени представлен на рис. 6.22.





а

б

Рис. 6.21. Световод с плоским и сферическим торцом (а).  
Форма профилированного сферического световода  
при увеличении x100 (б)

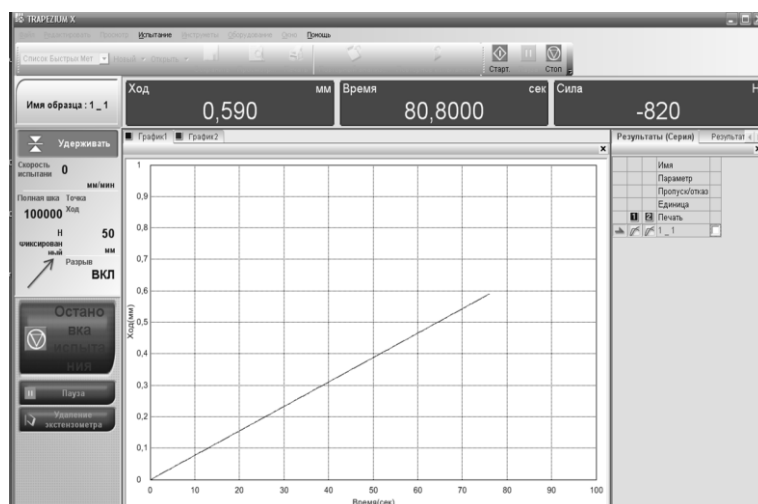


Рис 6.22. График режима травления боковой поверхности ИК-световодов

Разработанный режим позволяет достичь плавного уменьшения диаметра от 1100 до 600 мкм при длине конуса 42 мм (рис. 6.23). Результат испытаний профилированных световодов показал следующее: создание выпуклой сферической поверхности на торце световода позволяет изменить фокус светового пучка, как показано на рис. 6.24. Диаметр выходящего пучка излучения на расстоянии 1 мм от торца сферического световода с радиусом кривизны 1,27 мм составляет 0,26 мм (прожигает бумагу, ширина реза 0,26 мм). Для сравнения: диаметр луча, выходящего из плоского торца однослойного волокна с диаметром 1,12 мм, составляет 0,82 мм на аналогичном расстоянии от торца световода.

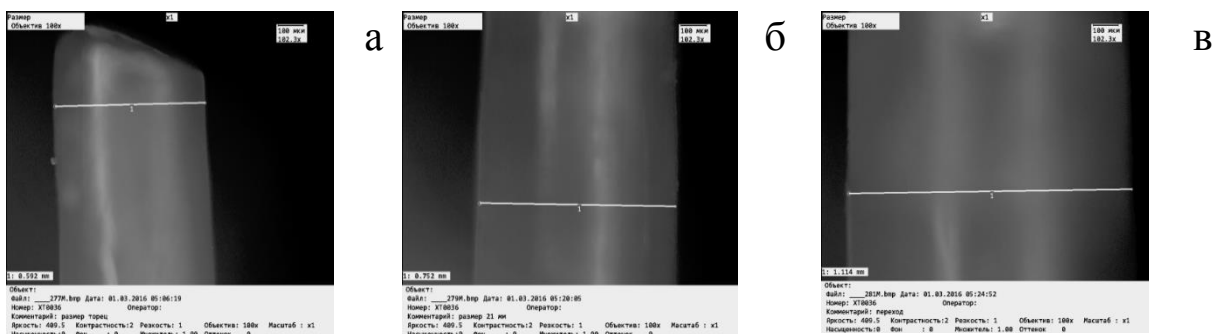


Рис.6.23. ИК-световод после травления: а – вершина конуса, диаметр 512 мкм; б – центр конуса, диаметр 752 мкм; в – основание конуса, диаметр 1114 мкм, переход в необработанную травителем область волокна

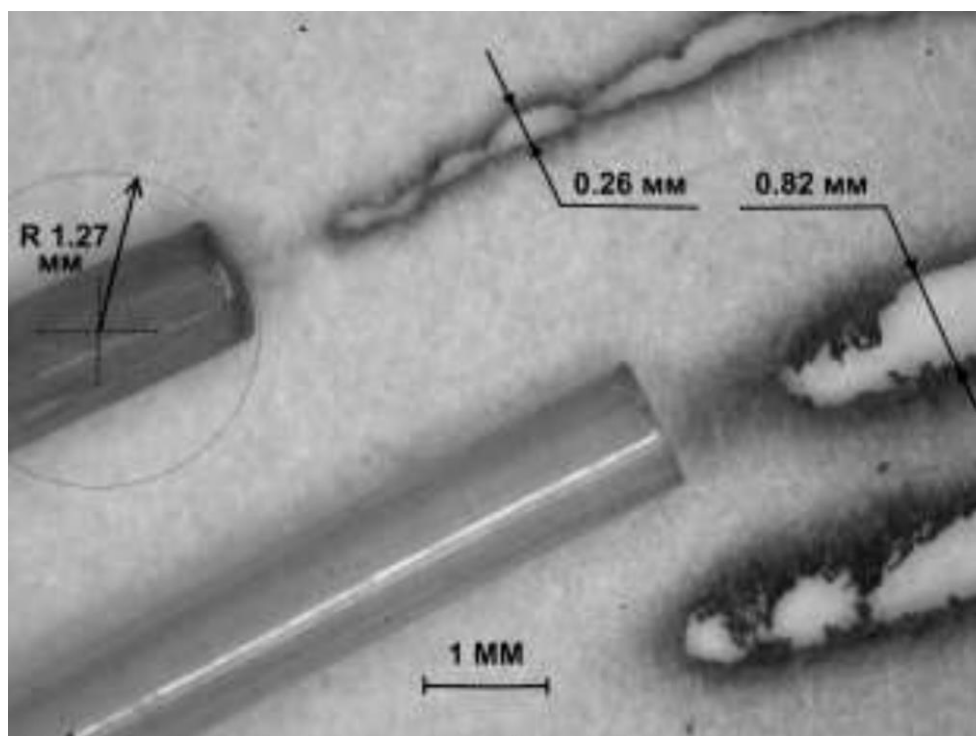


Рис. 6.24. Результат воздействия излучения  $\text{CO}_2$ -лазера мощностью 250 мВт на бумагу. ИК-световоды состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  с плоским и сферическим торцом

#### 6.4. Исследование люминесцентных свойств волоконных сцинтилляторов

Монокристаллы в форме волокна (кристалловолокна) стали объектом повышенного интереса [1]. За счёт вытянутой формы они являются идеальными средами для изготовления волноводов, в том числе волноводов ИК-диапазона, а также перестраиваемых узкополосных фильтров и элементов нелинейной оптики. В основном ведётся разработка в области методов выращивания кристалловолокон на основе оксидных материалов [7-9]. Но теоретически многие двухкомпонентные кристаллы, такие как бромид серебра, селенид цинка, йодид цезия и

даже хлорид натрия, имеют низкое собственное затухание [1]. Однако на практике получение монокристаллов в виде волоконных световодов большой длины связано с рядом серьёзных проблем. Скорости роста монокристаллических волокон очень малы и составляют всего несколько сантиметров в минуту. Столь низкие скорости роста увеличивают вероятность того, что диаметр световода будет непостоянным. Трудноосуществимой также представляется задача формирования в процессе роста правильной волоконно-оптической структуры с высоким показателем преломления сердцевины и низким оболочки. В связи с этим разработанный нами новый класс кристаллических неорганических сцинтилляторов и изготавливаемых из них гибких и длинных поликристаллических волоконных сцинтилляторов, имеющих одинаковый диаметр по всей длине, является более перспективным направлением [10–14].

На основе твёрдых растворов галогенидов серебра, активированных ТII и РЗЭ, авторы [10–13] разработали новый класс кристаллических неорганических сцинтилляторов (КНС), которые являются также ИК-материалами. Они прозрачны от видимой до дальней ИК-области спектра (0,4–40,0 мкм), имеют плотность 5,4–7,0 г/см<sup>3</sup>, обладают максимумом спектра свечения от 400 до 850 нм, в зависимости от химического состава. Время свечения КНС – 20 нс; световыход  $\alpha$ -сцинтилляций (плутоний – 229) 40–50 % относительно световыхода стильбена. На основе КНС, в состав кристаллов твёрдых растворов которых входит иодид одновалентного таллия [14], разработаны новые однослойные [13] и двухслойные [15] волоконные сцинтилляторы. Спектр свечения их сосредоточен в основном в красной и ближней ИК-области, т. е. от 590 до 850 нм (по полувысоте полосы свечения). Максимум спектра свечения составляет 730 нм (рис. 6.25). Гибкие и длинные световоды (до 50 м и более) получают методом экструзии из монокристаллических заготовок со скоростью 1,0–1,5 м/ч при температуре 180–190 °С и давлении 150–180 кг/см<sup>2</sup>. Структура двухслойного волокна (рис. 6.26) обеспечивает передачу сцинтилляционного излучения практически без потерь за счёт эффекта полного внутреннего отражения излучения в сердцевину волокна на границе раздела сердцевина – оболочка, ввиду того что состав сердцевины имеет больший показатель преломления из-за повышенного содержания ТII по сравнению с составом оболочки (табл. 6.5).

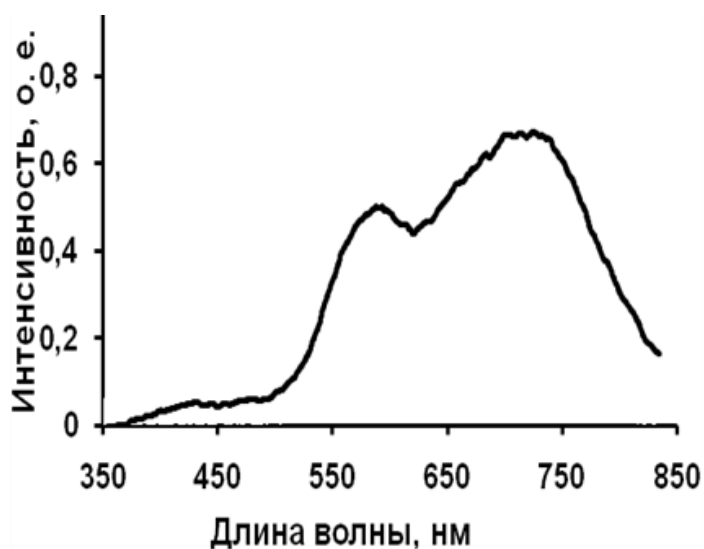


Рис. 6.25. Спектр люминесценции двух-  
слойного волоконного сцинтиллятора [14]

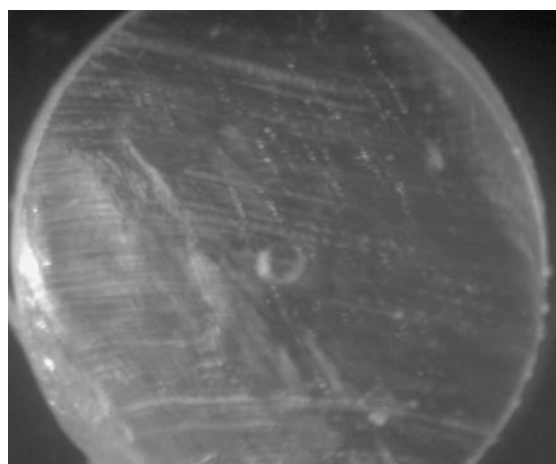


Рис. 6.26. Поперечное сечение  
двухслойного волоконного сцин-  
тиллятора [14]

Таблица 6.5

Химический состав кристаллов, мас. % [14]

Кристаллы	AgCl	AgBr	AgI	ТII
Сердцевина	5,0–10,0	87,5–85,0	0,5–1,0	7,0–4,0
Оболочка	18,0–20,0	80,5–79,4	0,1–0,5	0,5–1,0

Представленный новый класс двухслойных волоконных сцинтилляторов предназначен для регистрации тепловых нейтронов и пригоден для создания на их основе сцинтилляционных волоконных детекторов для радиационного экологического мониторинга территории, контроля космического и техногенного нейтронного фона, для создания комплексов технического контроля за ядерным топливом и изделиями из делящихся материалов, а также для создания антитеррористических комплексов радиационного контроля.

За два типа волоконных сцинтилляторов получена серебряная медаль на 37-й международной выставке изобретений новых технологий и продуктов в Женеве, апрель 2009 г. Изобретение [14] внесено в базу данных «Приоритетные направления развития науки и технологий и перспективные изобретения» ФГУ «Федерального института промышленной собственности Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам» для продвижения разработки на отечественном и мировом рынках.

## 6.5. Исследование радиационной стойкости ИК-световодов

Изучение радиационной стойкости световодов на основе твёрдых растворов  $\text{AgBr} - \text{TlI}$  и  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$  проводилось на линейном ускорителе электронов модели УЭЛР-10-10С (УрФУ) и на исследовательской ядерной установке ИВВ-2М АО «ИРМ» (г. Заречный). На линейном ускорителе электронов модели УЭЛР-10-10С была набрана последовательно доза облучения 10 и 18 кГр, а на исследовательской ядерной установке ИВВ-2М – доза 70 и 500 кГр (рис. 6.27 – 6.29).

Измерения показали монотонное падение передаваемого сигнала во всём исследуемом диапазоне ( $3500\text{--}560\text{ см}^{-1}$ ) без изменения диапазона прозрачности (см. рис. 6.27). ИК-световод состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  ухудшил свои характеристики на 34 % при длине волны 5 мкм, а на длине волны 7,7 мкм – на 10,2 % при общей дозе 18 кГр.

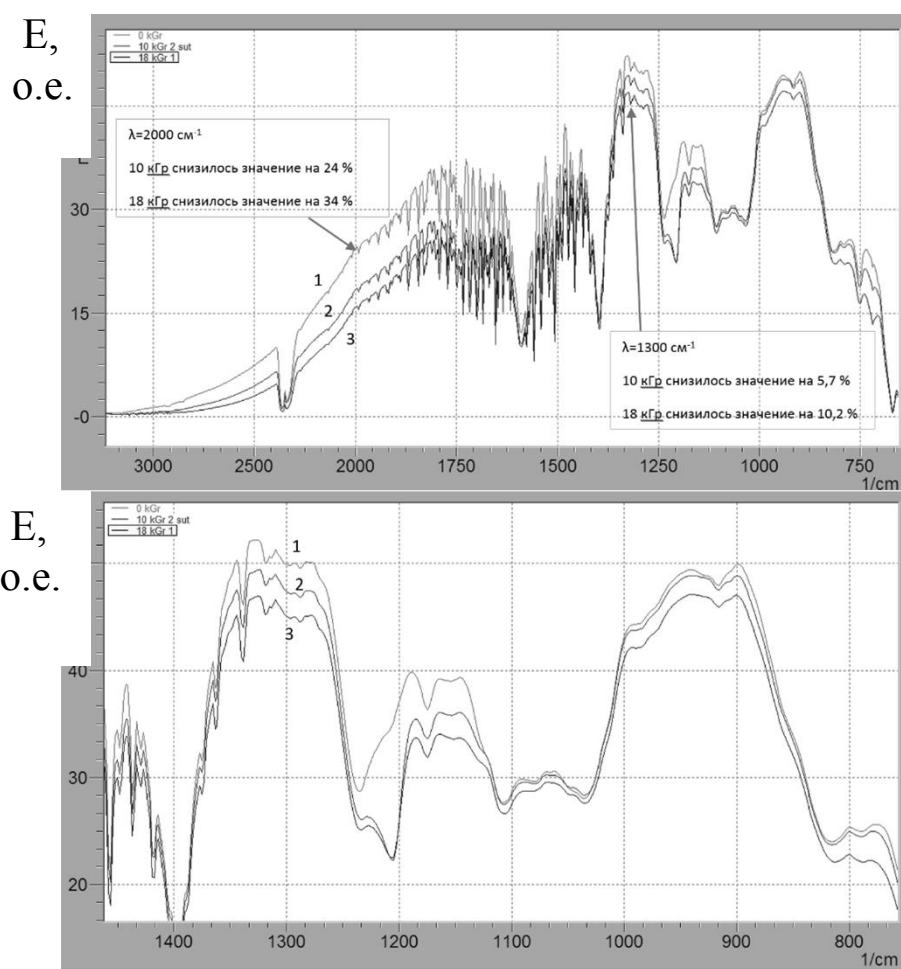
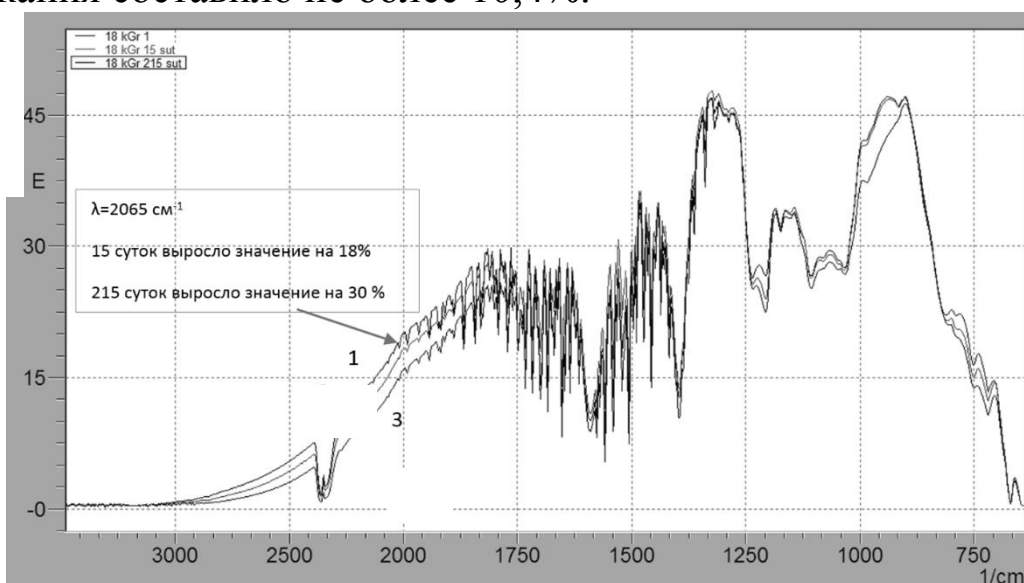


Рис. 6.27. ИК спектры световода состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  длиной 1 м в зависимости от величины дозы ионизирующего излучения. Условия съёмки – КРТ-детектор, доза облучения: 1 – 0 кГр; 2 – 10 кГр; 3 – 18 кГр. а – диапазон съёмки  $3500\text{--}560\text{ см}^{-1}$ ; б – диапазон съёмки  $1500\text{--}750\text{ см}^{-1}$

Исследование зависимости прозрачности световода от времени после облучения дозой 18 кГр представлена на рис. 6.28. Сделан вывод, что произошёл послерадиационный отжиг. В коротковолновой части спектра пропускание увеличивается, в диапазоне длин волн от 6 до 10 мкм пропускание не изменяется, а в диапазоне более 10 мкм незначительно снижается. Таким образом, результирующий спектр после облучения дозой радиации 18 кГр и выдержкой после этого 215 сут в сравнении со спектром этого же световода показан на рис. 6.29.

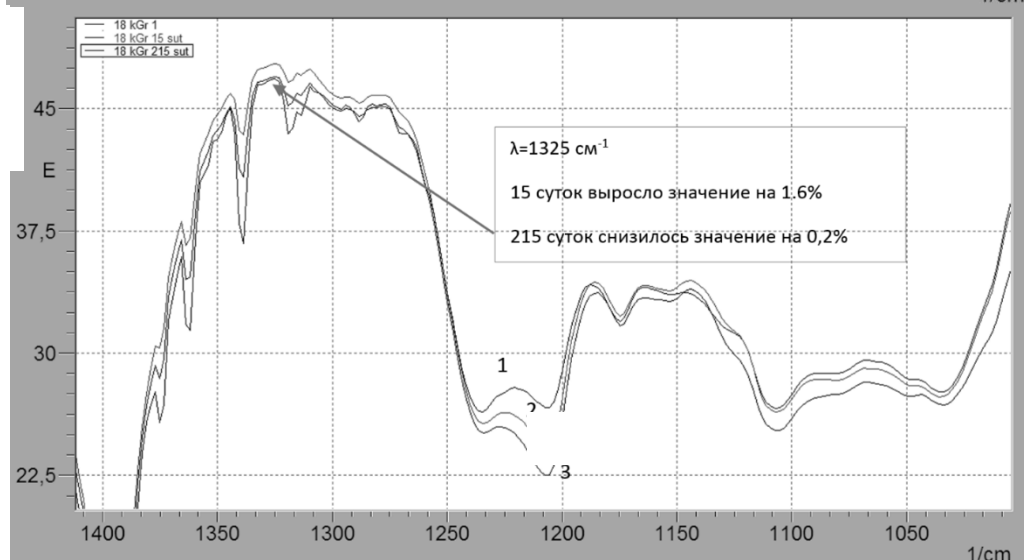
В диапазоне длин волн от 6 до 14 мкм падение интенсивности пропускания составило не более 10,4%.

Е,  
о.е.



а

Е,  
о.е.



б

Рис.6.28. Зависимость пропускания ИК-световода состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  длиной 1 м от времени, проведенного после облучения дозой 18 кГр: 1 – 0 сут; 2 – 15 сут; 3 – 215 сут. а – диапазон съёмки  $3500\text{--}560\text{ см}^{-1}$ ; б – диапазон съёмки  $1400\text{--}1000\text{ см}^{-1}$

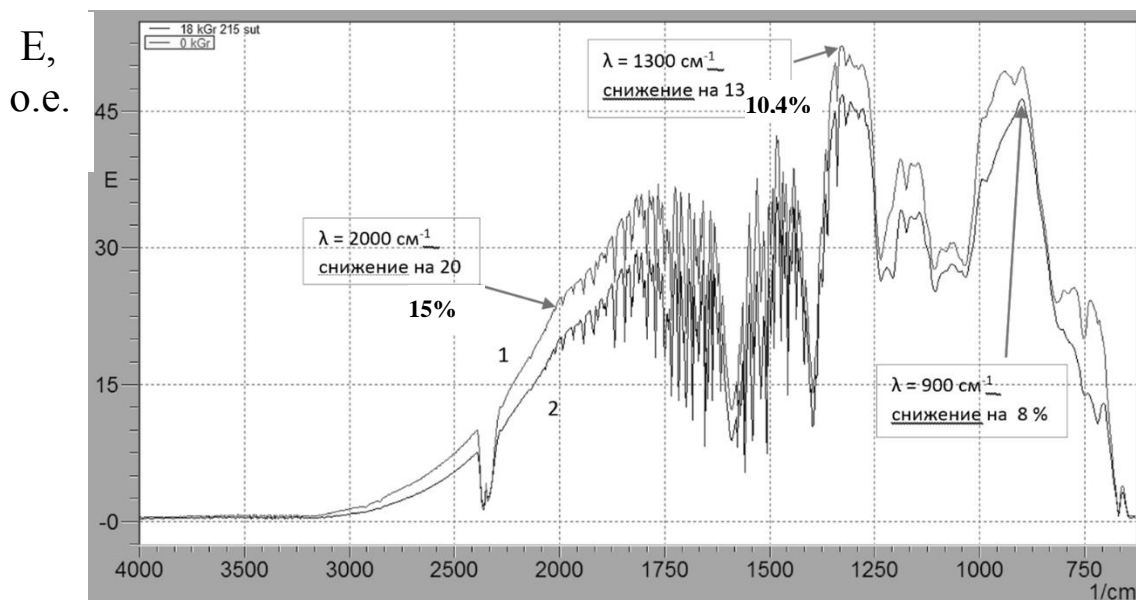


Рис. 6.29. Сравнение ИК-спектров световода состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ :  
1 – до облучения; 2 – после облучения дозой радиации 18 кГр и выдержкой после этого 215 сут

Исследования радиационной стойкости ИК-световодов проводились на ядерной установке ИВВ-2М в 3 этапа:

- этап 1 – изготовление двух идентичных контейнеров с образцами для испытаний;
- этап 2 – проведение облучения контейнеров с образцами световодов ионизирующим излучением;
- этап 3 – оценка оптических свойств образцов световодов.

На первом этапе изготовлены и испытаны на герметичность и плавучесть два контейнера в соответствии со следующими техническими требованиями.

### *1. Конструкция контейнера.*

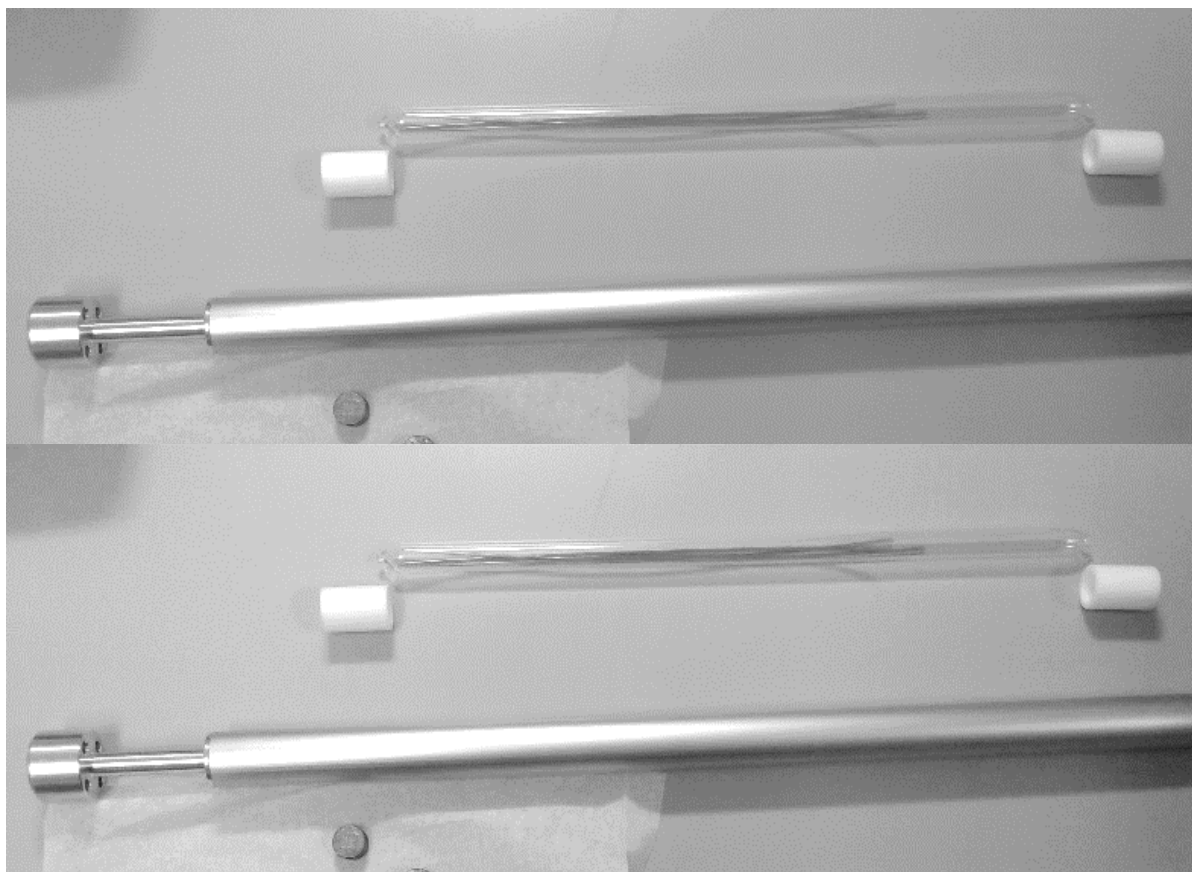
Наружная оболочка контейнера выполнена из алюминиевого сплава и обеспечивает герметичность при избыточном давлении 1 кгс/см<sup>2</sup>. Габаритные размеры контейнера: высота 440 мм, диаметр 23,5 мм. Вес контейнера до 200 г, обеспечивающий отрицательную плавучесть в воде.

### *2. Конструкция внутренней капсулы.*

Внутренняя капсула выполнена из стекла пирекс. Габаритные размеры капсулы: высота 225 мм, диаметр 10 мм. Вес капсулы с образцами – 20 г. Количество образцов световодов в капсуле – 3 шт. Размеры образцов световодов: диаметр 1,12 мм; длина

170 мм ± 10 мм. Состав световодов:  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ ,  $\text{Ag}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$ , плотность 6,8 – 7,0 г/см<sup>3</sup>, диапазон прозрачности 2,5 – 25 мкм.

На рис. 6.30 представлен внешний вид контейнеров и внутренних капсул со световодами.



№1

№2

Рис. 6.30. Контейнеры №1, № 2 с ИК-световодами

На втором этапе проведено облучение световодов ионизирующим излучением. Облучение проводилось в «мокрое» канале. Параметры облучения: доза облучения контейнера № 1 – 70 кГр; доза облучения контейнера № 2 – 500 кГр. Внутренняя капсула извлекалась из контейнера после облучения и передавалась для измерений на ИК-Фурье-спектрометр (3 этап).

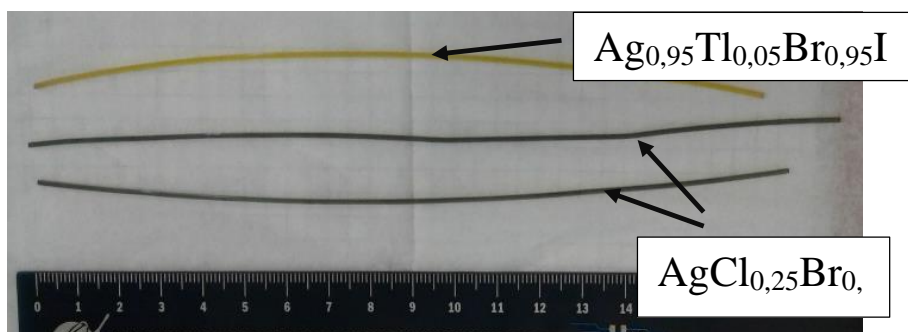
Спектры и внешний вид самих световодов после набора доз 70 и 500 кГр приведены на рис. 6.31 – 6.33.

Световоды состава  $\text{Ag}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$  меньше изменили цвет, относительно первоначального (см. рис. 6.30, 6.31), в то время как световоды  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  значительно изменили свой цвет с желтого до тёмно-зелёного, что коррелирует с ИК спектрами до и после облучения (см. рис. 6.32, 6.33).



Ампула № 1  
Доза 70 кГр

1



Ампула №2,  
Доза 500 кГр

2

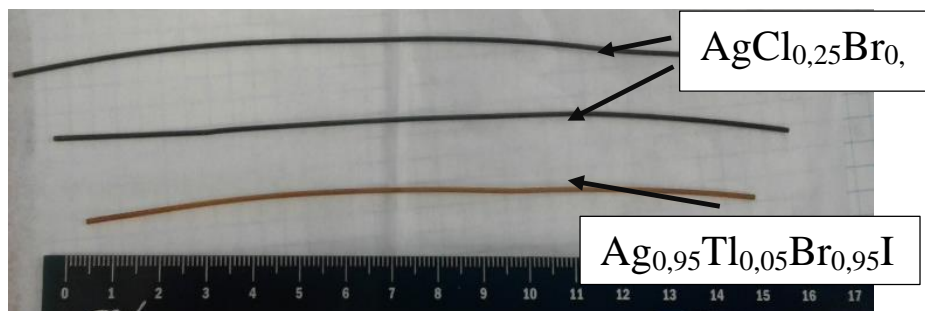


Рис. 6.31. Внешний вид световодов после облучения ионизирующим излучением

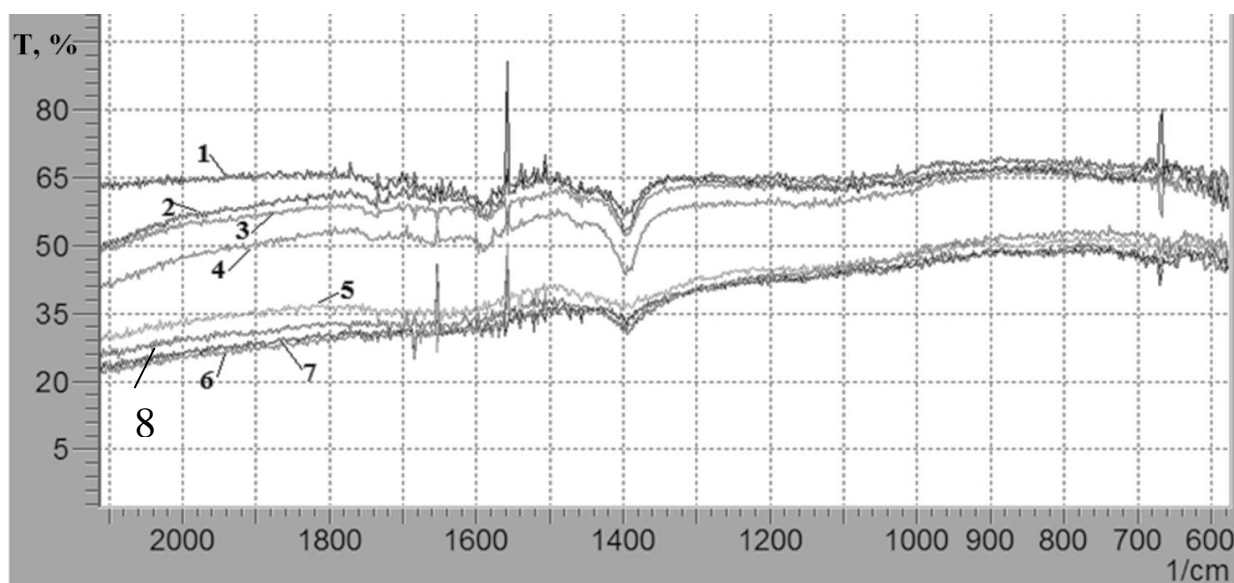


Рис. 6.32. Сравнение ИК спектров световода состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ :  
1, 4 – до облучения ампула № 2; 2, 3 – до облучения ампула № 1; 5 – после облучения дозой радиации 500 кГр образец световода 1; 6 – после облучения дозой радиации 70 кГр образец световода 4; 7 – после облучения дозой радиации 70 кГр образец световода 2; 8 – после облучения дозой радиации 500 кГр образец световода 3

Относительно световодов состава  $\text{Ag}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$  можно сделать следующий вывод: при набранной дозе 70 кГр световод уменьшил пропускание на 20 % в диапазоне 14–20 мкм, в то же время увеличил пропускание на 45 % в диапазоне 4–6 мкм при сохранении пропускания на том же уровне в диапазоне 11–13 мкм. При набранной дозе

500 кГр световод уменьшил пропускание на 40 % в диапазоне 14–20 мкм, в то же время увеличил пропускание на 72 % в диапазоне 4–6 мкм при сохранении пропускания на том же уровне в диапазоне 11–13 мкм (см. рис. 6.33).

Доказана большая радиационная стойкость ИК-световодов при введении в их состав ТlI, а также обнаружен просветляющий эффект для системы AgBr–ТlI в диапазоне длин волн 4–11 мкм при наборе доз 70 и 500 кГр.

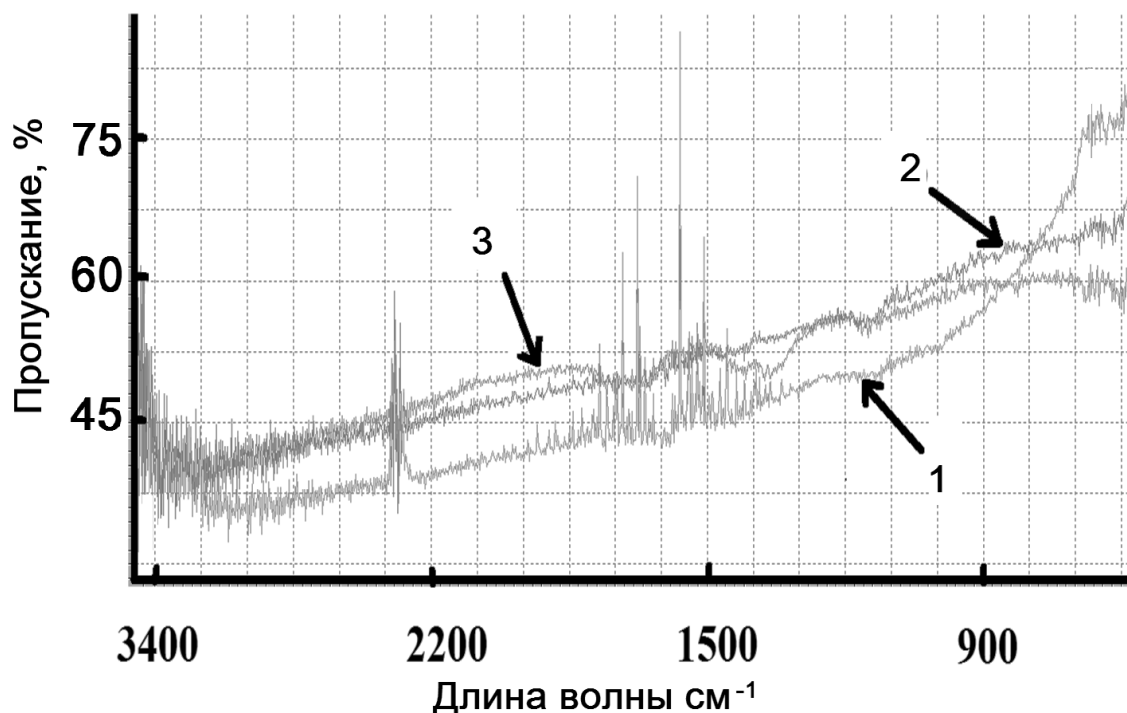


Рис. 6.33. Сравнение ИК-спектров световода состава  $\text{Ag}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$ :  
1 – до облучения; 2 – после облучения дозой радиации 70 кГр;  
3 – после облучения дозой радиации 500 кГр

## 6.6. Исследование механических свойств ИК-световодов

Коэффициент Пуассона характеризует упругие свойства материала и не зависит от размеров образца, а зависит от природы материала. Модуль упругости характеризует сопротивление материала растяжению/сжатию при упругой деформации или свойство объекта деформироваться вдоль оси при воздействии силы вдоль этой оси; определяется как отношение напряжения к удлинению. Часто модуль Юнга называют просто модулем упругости.

Определение предела прочности проводили на световодах диаметром 1,1 мм и длиной 100 мм при нагрузке 10 кН при перемещении

траверсы со скоростью 20 мм/мин. В табл. 6.6 приведены в качестве примера механические свойства для кристаллов системы AgBr – TlI.

Полученные закономерности позволяют сделать вывод, что увеличение содержания TlI в кристаллах и световодах приводит к повышению их прочности. Это можно объяснить механизмом твердорастворного упрочнения.

Таблица 6.6

Механические свойства кристаллов и ИК-световодов системы  
AgBr – TlI

Содержание TlI в образце, мол. %	1,0	3,0	5,0
Коэффициент Пуассона	0,33	0,34	0,34
Модуль упругости (Юнга), ГПа	26,00	33,00	37,00
Предел прочности световодов на разрыв, МПа	180,00	209,00	211,00
Средний размер зерна, нм (Рисунок 6.34-6.36)	237	202	96

Исследованы зависимость прочности от величины зерна поликристаллического световода (см. табл. 6.6, рис. 6.34 – 6.36). Следует отметить, что, с одной стороны, величина зерна влияет на механические и оптические свойства: чем меньше зерно, тем меньше межзеренные границы и тем прозрачнее материал в более коротковолновой области спектра. С другой стороны, уменьшение размера зерна повышает прочность и гибкость световодов, так как не происходит разрушения, связанного с образованием микротрещин. В более мелкозернистой структуре световода образуется значительно меньше микротрещин при деформации материала.

Сделаны снимки структур световодов на растровом электронном микроскопе FEICM 30 (см. рис. 6.34 – 6.36). Для определения среднего размера зерна каждого состава использовалась программа CellSensStandart.

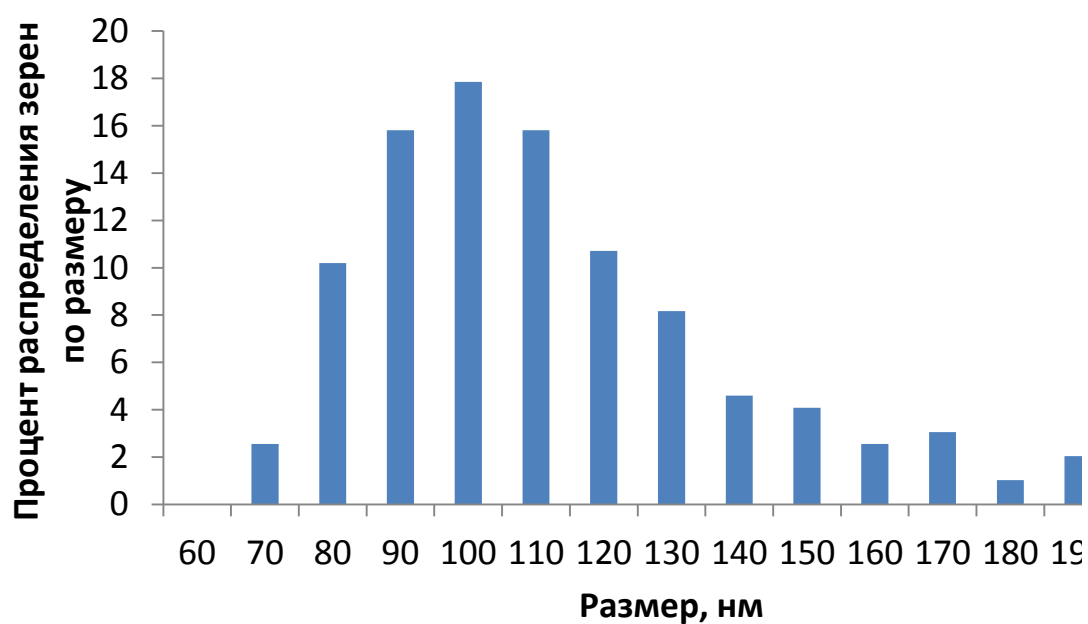
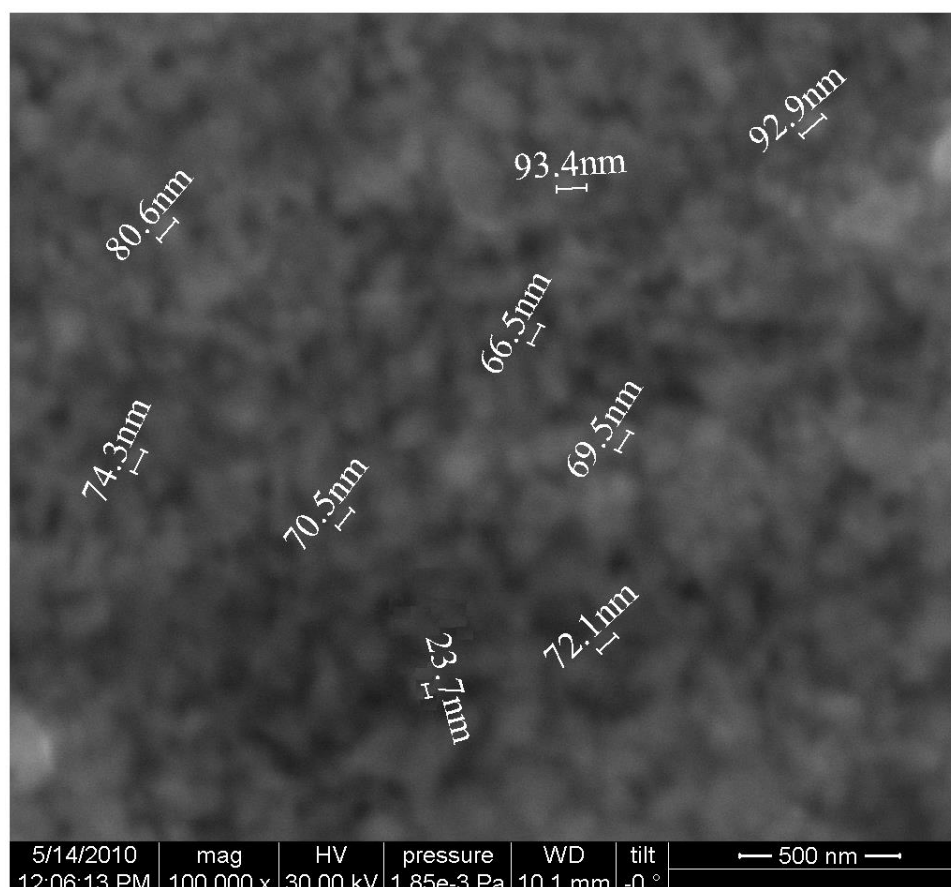


Рис. 6.34. Световод состава  $\text{Ag}_{0.95}\text{Tl}_{0.05}\text{Br}_{0.95}\text{I}_{0.05}$ : изображение структуры световода СЭМ (а); гистограмма распределения размеров зерен световода (б)

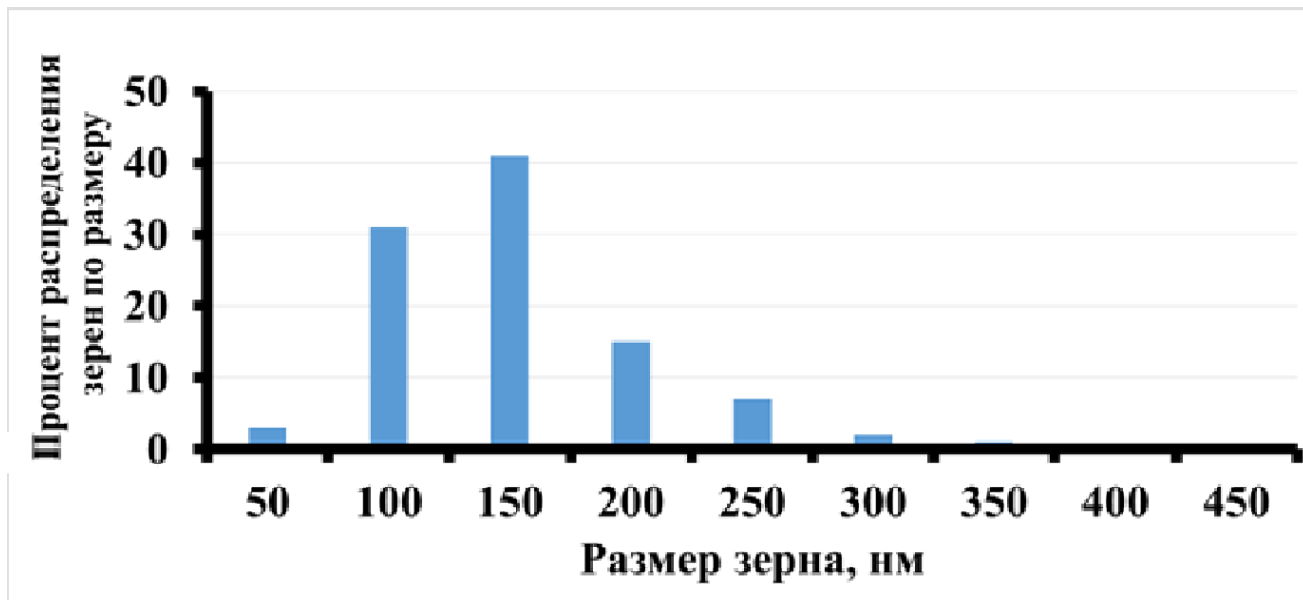
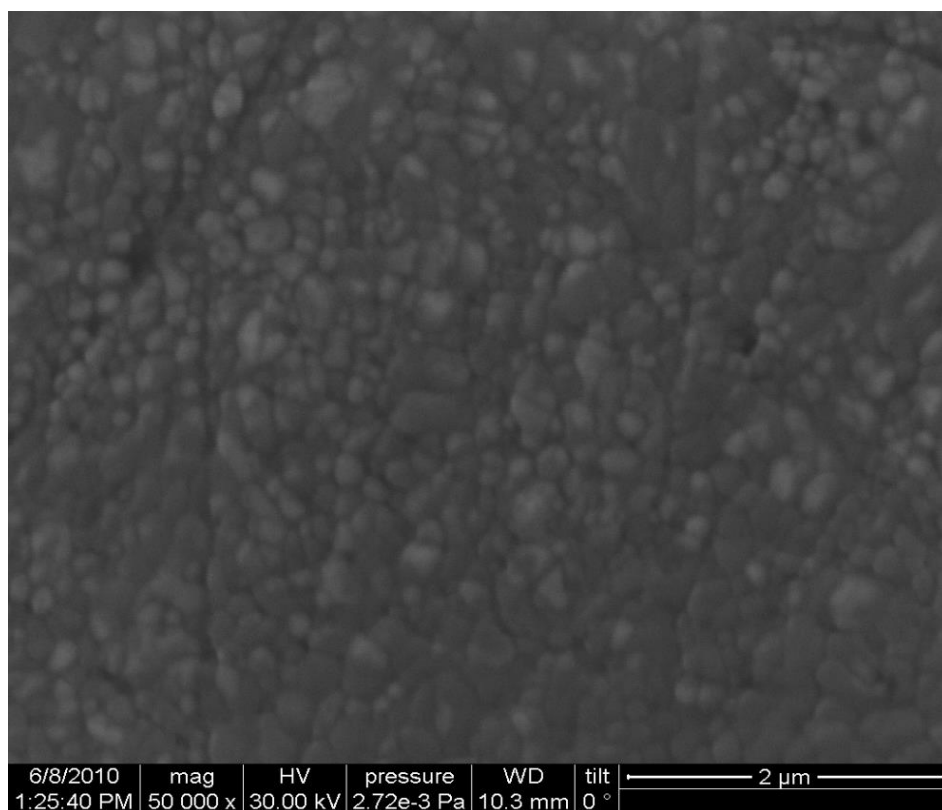


Рис. 6.35. Световод состава  $\text{Ag}_{0.97}\text{Tl}_{0.03}\text{Br}_{0.97}\text{I}_{0.03}$ : изображение структуры световода СЭМ (а); гистограмма распределения размеров зерен световода (б)

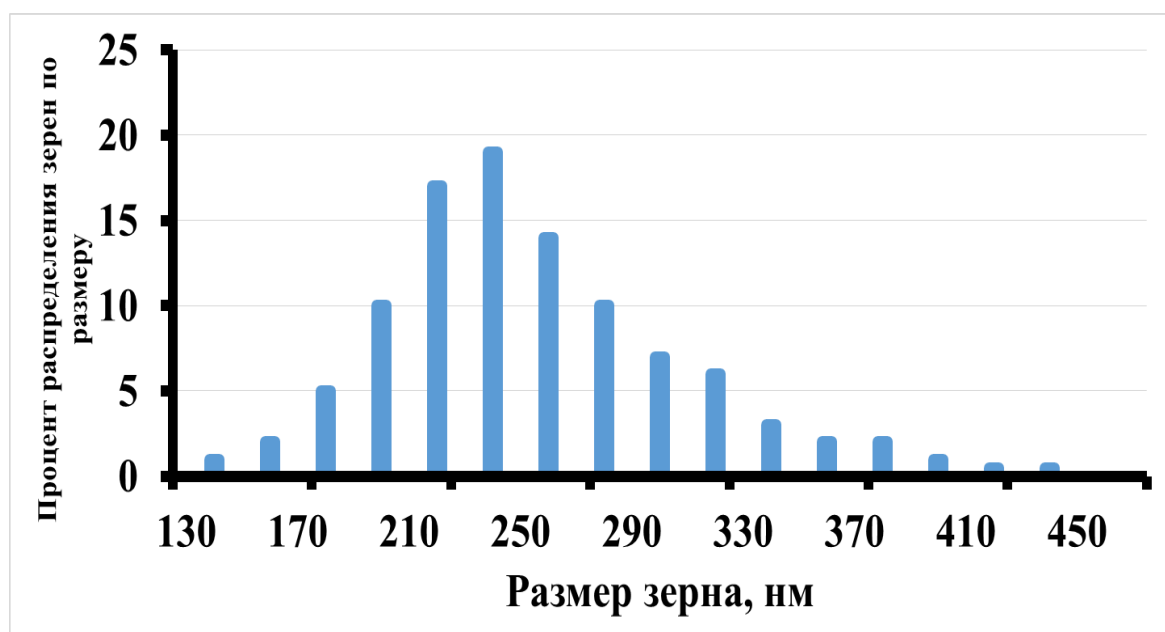
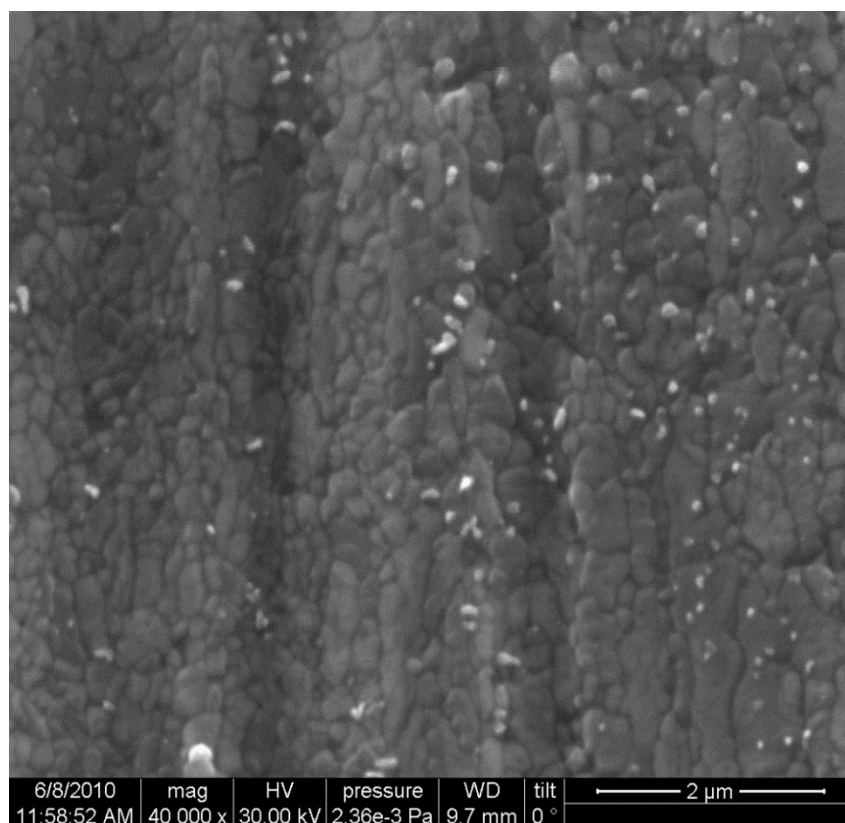


Рис. 6.36. Световод состава  $\text{Ag}_{0.99}\text{Ti}_{0.01}\text{Br}_{0.99}\text{I}_{0.01}$ : изображение структуры световода СЭМ (а); гистограмма распределения размеров зерен световода (б)

## Выводы по главе 6

В данной главе представлен спектральный диапазон пропускания ИК-световодов на основе кристаллов систем  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ ,

AgBr – AgI, AgBr – TlI, AgBr – (TlBr<sub>0,46</sub>I<sub>0,54</sub>). Показана зависимость смещения диапазона прозрачности световодов в длинноволновую область при введении в состав галогенидсеребряных световодов более тяжелого по молекулярной массе TlI в AgBr и TlBr<sub>0,46</sub>I<sub>0,54</sub> в AgBr. Установлено расширение диапазона прозрачности световодов в ближневолновую область спектра при уменьшении их длины. Показаны общие закономерности изменения оптико-механических свойств в зависимости от состава световодов при воздействии на образцы различных составов ионизирующего и инфракрасного излучения.

1. Представлены схема и методика измерения спектров пропускания ИК-световодов с использованием тестовых волокон составов AgCl<sub>0,5</sub>Br<sub>0,5</sub>, AgCl<sub>0,25</sub>Br<sub>0,75</sub> и Ag<sub>0,95</sub>Br<sub>0,95</sub>Tl<sub>0,05</sub>I<sub>0,06</sub>.

2. Для световода состава AgBr<sub>0,75</sub>Cl<sub>0,25</sub> представлено определение лучевой прочности 61 кВт/см<sup>2</sup> при излучении СО<sub>2</sub>-лазера в непрерывном режиме. Установлено, что при многократном изгибе световодов диаметром 1,12; 0,90; 0,53 мм на радиус 100 мм оптические потери не изменяются и имеют величину от 0,1 до 0,4 дБ/м в зависимости от химического состава на длине волны 10,6 мкм.

3. Приведены результаты экспериментального подтверждения одномодового режима работы смоделированного и изготовленного фотонно-кристаллического световода с площадью поля моды 7850 мкм<sup>2</sup>.

4. Представлены сцинтилляционные свойства волоконных сцинтилляторов на основе разработанных на уровне изобретения галогенидсеребряных кристаллов, содержащих TlI. Определен максимум спектра свечения, который составляет от 400 до 850 нм в зависимости от химического состава волоконного сцинтиллятора.

### *Задачи*

1. Излучение длиной волны 10,6 мкм передается по однослойному световоду на основе твердого раствора AgCl<sub>0,25</sub>Br<sub>0,75</sub> длиной 1 м. Спектр пропускания представлен на рис. 6.5. Показатель преломления волокна равен  $n_f$ , окружающей среды  $n_e$  (см. табл. 6.7). Определите суммарные собственные потери в данном световоде, если френелевские потери определяются как

$$r = \left( \frac{n_f - n_e}{n_f + n_e} \right)^2 * 100\%.$$



### Данные для решения задачи

№ варианта	$n_{\text{clad}}$	$n_{\text{core}}$
1	2,136	2,149
2	2,136	2,140
3	2,138	2,145
4	2,138	2,149
5	2,140	2,156
6	2,140	2,149
7	2,149	2,154
8	2,149	2,156
9	2,154	2,161
10	2,154	2,162

### *Библиографический список*

1. Кацуяма, Т. Инфракрасные волоконные световоды / Т. Кацуяма, Х. Мацумура. — Москва : Мир, 1992. — 272 с.
2. Кристаллы для ИК - техники  $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$ ,  $\text{AgCl}_x\text{Br}_y\text{I}_{1-x-y}$  и световоды на их основе / Л.В. Жукова [и др.] // Неорганические материалы. — 2008. — Т. 44, № 12. — С. 1516-1521.
3. Майер, А. А. Теория и методы выращивания кристаллов / А. А. Майер — Москва : МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1970. — 292 с.
4. Bunimovich, D. Dielectric properties of silver halide and potassium halide crystals / D. Bunimovich, A. Katzir // Appl. Opt. — 1993. — Vol. 32, №. 12. — P. 2045-2048.
5. Investigating the optical properties of polycrystalline  $\text{AgCl}_{1-x}\text{Br}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) and  $\text{Ag}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$  for IR engineering / A. S. Korsakov [et al.] // Applied Optics. — 2016. — Vol. 54, № 26. — P. 8004-8009.
6. Improved fiber-detector coupling for MIR spectroscopy employing shaped silver halide fibers / J. Frank [et al.] // Appl. Spectrosc. — 2000. — Vol. 54, № 10. — P. 1417-1422.
7. Fukuda, T. Fiber crystal growth from melt. Advances in Materials Research / T. Fukuda, P. Rudolph, S. Uda. — Berlin : Springer, 2004.— 281 p.



8. Черепанов, А. Н. Люминесценция объемных, волоконных и наноразмерных кристаллов LiF и NaF / А. Н. Черепанов. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. — 304 с.
9. Черепанов, А. Н. Теоретические основы выращивания волоконных монокристаллов: метод лазерного разогрева / А. Н. Черепанов, Б. В. Шульгин, Т. С. Королева // Проблемы спектроскопии и спектрометрии. — 2005. — Т. 18. — С. 33-40.
10. Жукова Л.В. Серебряная медаль ВДНХ СССР, удостоверение № 17604, постановление от 04.12.86. Высокочистые кристаллы галогенидов серебра.
11. Кристаллический сцинтиллятор Лия-2 : пат. 2066464 Рос. Федерации, МПК G01T1/202 / Жукова Л. В., Жуков В. В., Шульгин Б. В., Китаев Г. А., Гаврилов Л. Ф., Викторов Л. В. ; заявитель и патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью Научно-технический центр «Оптические материалы» при Уральском государственном техническом университете. — заявл. 31.05.1994 ; опубл. 10.09.1996, Бюл. 7. — 4 с.
12. Сцинтилляционный световод : пат. 2154290 Рос. Федерации, МПК 7 G02B6/02, G02B6/16 / Жукова Л. В., Жуков В. В., Шульгин Б.В., Макурин Ю. Н. ; заявитель и патентообладатель Уральский государственный технический университет. — заявл. 11.05.1999 ; опубл. 10.08.2000, Бюл. 22. — 3 с.
13. Кристаллический сцинтиллятор Лия-3 : пат. 2284044 Рос. Федерации, МПК G01T1/202 / Жукова Л. В., Шульгин Б. В., Жуков В. В., Горкунова С. И., Райков Д. В., Чазов А. И., Сергеев А. В. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Уральский государственный технический университет-УПИ. — заявл. 13.05.2005 ; опубл. 20.09.2006, Бюл. 26. — 3 с.
14. Способ получения двухслойного волоконного сцинтиллятора : пат. 2411280 Рос. Федерации, МПК C09K11/08 C09K11/62 G02B6/02 G01T1/20 / Жукова Л. В., Шульгин Б. В., Корсаков А. С., Жуков В. В. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. — заявл. 08.04.2008 ; опубл. 10.02.2011, Бюл. 4. — 3 с.
15. Способ получения волоконных сцинтилляторов : пат. 2361239 Рос. Федерации, МПК G01T1/00 / Жукова Л. В., Черепанов А. Н., Примеров Н. В., Корсаков А. С., Шульгин Б. В. ; ГОУ ВПО Уральский государственный технический университет-УПИ. — заявл. 07.04.2008 ; опубл. 10.07.2009, Бюл. 19. — 3 с.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ СВЕТОВОДОВ

В настоящее время в центре инфракрасных волоконных технологий при Химико-технологическом институте УрФУ (ИВЦ «ЦИВТ») разработана высокотехнологичная коммерциализуемая продукция на основе новой элементной базы фотоники: кристаллы, линзы, окна, плёнки, оптические слои, фотонно-кристаллические световоды. Разрабатывается и внедряется полный технологический цикл, включающий проектирование и изготовление нестандартного оборудования по синтезу сырья, выращивание новых кристаллов и изготовление оптических изделий из них, работающих в традиционных и новых спектральных диапазонах (рис. 7.1).

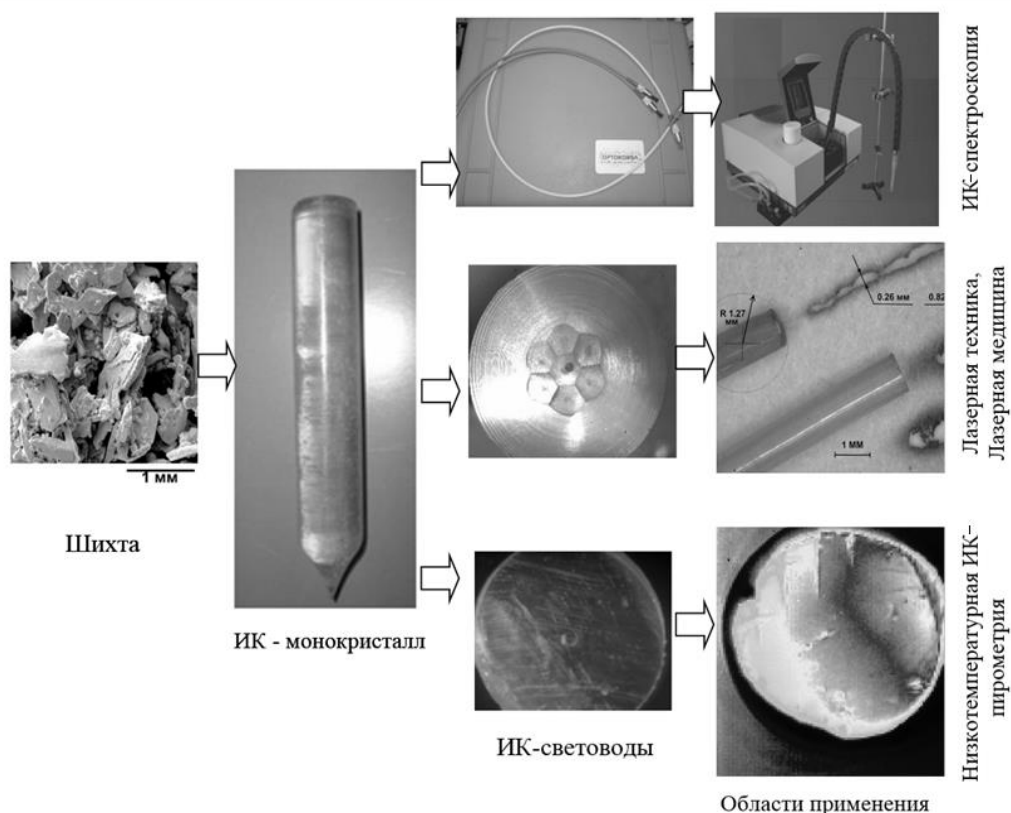


Рис. 7.1. Этапы производства ИК- волоконно-оптических материалов в инновационно-внедренческом центре «Инфракрасных волоконных технологий». Области применения

Инфракрасные световоды, изготавливаемые в ИВЦ «ЦИВТ» методом экструзии на основе кристаллов твердых растворов галогенидов

серебра и таллия (I), представляют собой нетоксичные негигроскопичные волокна, обладающие высокой гибкостью и прочностью, а также высоким пропусканием в широком диапазоне длин волн [1-5]. Уникальные свойства данных материалов позволяют использовать как одно- и двухслойные световоды, так и фотонно-кристаллические волокна в широком спектре устройств и систем для решения различных практических задач.

## 7.1. Однослойные и двухслойные ИК-световоды

### 7.1.1. Зондовая ИК-Фурье-спектрометрия

Основная задача каждого исследователя-аналитика – это наблюдение и обработка различных эффектов, получаемых от объекта исследования. Существует широкая линейка детекторов, регистрирующих различные сигналы: электромагнитные, тепловые, акустические и т. д. Все они работают с разной чувствительностью и в различных диапазонах – от широко спектральных до узких (специальных). В связи с этим одно из ключевых мест в аналитических науках занимают экспресс-методы, позволяющие в короткое время регистрировать эффект, «запомнить» его и предоставить в дальнейшем для изучения. Помимо задачи быстро реагирующих детекторов, актуальной в свете on-line контроля (анализа) является проблема каналов доставки аналитических сигналов на детектор. На базе разработанной в ИВЦ «ЦИВТ» оптической продукции был создан инфракрасный волоконно-оптический зонд для ИК-Фурье-спектрометра (рис. 7.2, 7.3).

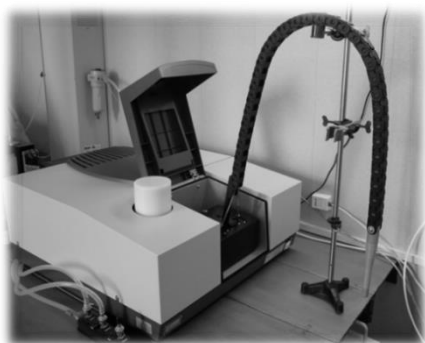


Рис. 7.2. ИК-Фурье-спектрометр с волоконно-оптическим зондом



Рис. 7.3. Блок подключения оптоволоконного зонда для проведения измерений вне кюветного отделения спектрометра

Волоконно-оптический зонд соединяется с любым типом спектрометров посредством универсальной оптической приставки/блока,

разработанной и производимой в ИВЦ «ЦИВТ» УрФУ (рис. 7.3, 7.4), Блок размещается в кюветном отделении, к нему посредством SMA 905 разъёмов присоединяется ИК-зонд, и осуществляется измерение спектров на расстоянии от прибора.

В зависимости от предмета исследования могут быть использованы различные типы рабочих элементов: волоконно-оптический датчик многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) тип «петля» (для жидких и пастообразных неагрессивных сред), МНПВО-датчик типа «конус» или «призма» (для твёрдых и жидких агрессивных сред) (рис. 7.5) [6-8]. На рис. 7.6-7.9 приведены спектры фона ИК зондов при использовании КРТ- и DLATGS-детекторов. Под пределом обнаружения ИК-зондов понимается минимальная определяемая концентрация исследуемого вещества. В пределах рабочего диапазона интенсивность определяемого пика варьируется в зависимости от соотношения сигнал/шум ИК-Фурье-спектрометра.

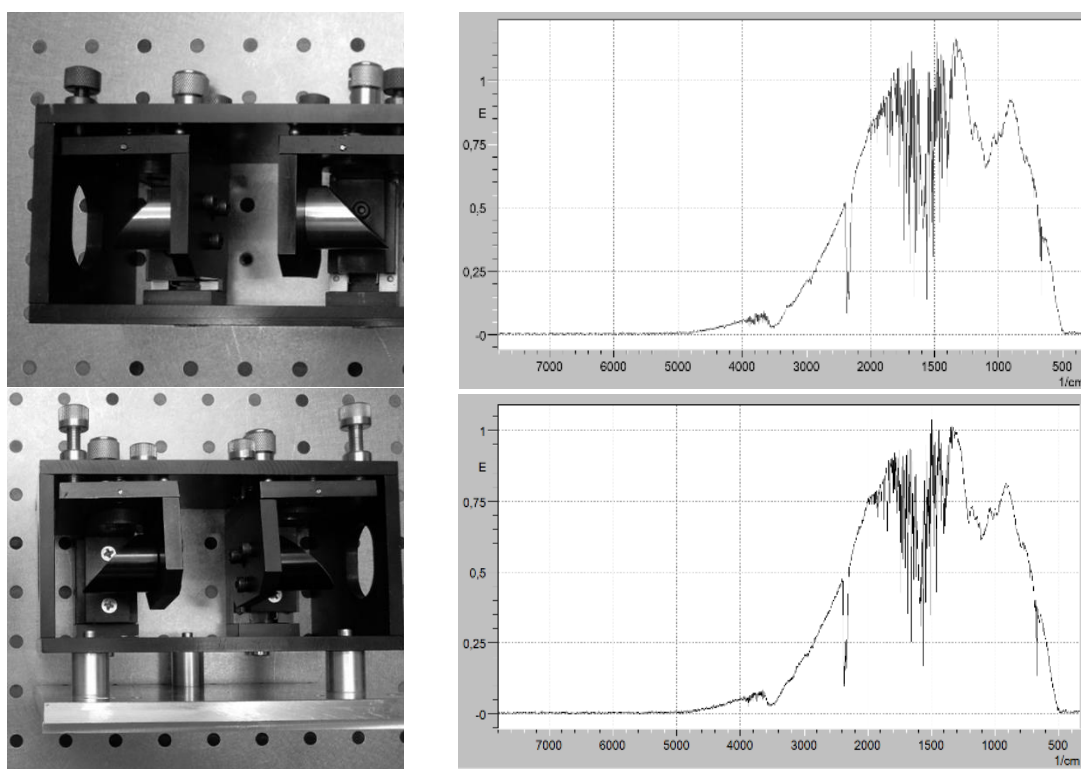


Рис. 7.4. Оптический блок для ввода излучения в волокно от спектрометра. Сравнение спектральных характеристик блока при тестовом световоде состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ , внеосевые параболические зеркала с PFL -12,7 мм производства: – ИВЦ «ЦИВТ» УрФУ; 2 – EdmundOptics (США)

**Волоконно-оптический зонд с рабочим элементом типа  
«петля» (для неагрессивных жидких сред) Optokorsa IRF-L**

Наименование характеристик	Значение характеристик
Материал волокна	Твердый раствор AgCl-AgBr
Материал чувствительного элемента	Твердый раствор AgCl-AgBr
Материал корпуса зонда	Полиэфирэфиркетон
Материал защитной оболочки световодов	Фторопласт
Рабочий диапазон для определения примесей (с использованием КРТ-детектора)	3650 – 670 см <sup>-1</sup>
Предел обнаружения(с использованием КРТ-детектора, чувствительный элемент «двойная петля»)	0,001 моль/л
Рабочий диапазон для определения примесей (с использованием , DLATGS-детектора)	3200 – 550 см <sup>-1</sup>
Предел обнаружения(с использованием , DLATGS-детектора, чувствительный элемент «двойная петля»)	0,1 моль/л
Диапазон рабочих температур	от -40°C до +150°C
Общая длина зонда	1 м
Диаметр погружной части/длина	14 мм/80 мм
Минимальный радиус изгиба	125 мм
Тип коннекторов	SMA-905



а



**Волоконно-оптический зонд с рабочим элементом типа «призма НПВО»  
(алмаз) Optokorsa IRF-D (для твёрдых и жидких агрессивных сред)**

Наименование характеристик	Значение характеристик
Материал волокна	Твердый раствор AgCl-AgBr
Материал чувствительного элемента	Алмаз III A
Материал корпуса зонда	Полиэфирэфиркетон (PEEK)
Материал защитной оболочки световодов	Фторопласт
Рабочий диапазон для определения примесей (с использованием КРТ -детектора)	3650 – 670 см <sup>-1</sup>
Предел обнаружения (с использованием КРТ - детектора, чувствительный элемент «призма НПВО» (алмаз))	0,005 моль/л
Рабочий диапазон для определения примесей (с использованием , DLATGS-детектора)	1950 – 560 см <sup>-1</sup>
Предел обнаружения (с использованием , DLATGS-детектора, чувствительный элемент «призма НПВО» (алмаз))	0,5 моль/л
Диапазон рабочих температур	от -40°C до +150°C
Общая длина зонда	1 м
Диаметр погружной части/длина	14 мм/80 мм
Минимальный радиус изгиба	125 мм
Тип коннекторов	SMA-905



б

Рис. 7.5. Зонды для ИК-Фурье-спектроскопии с рабочими элементами типа «петля», «двойная петля» (для жидких сред), призма НПВО (материал CWD алмаз), созданные в УрФУ[6]

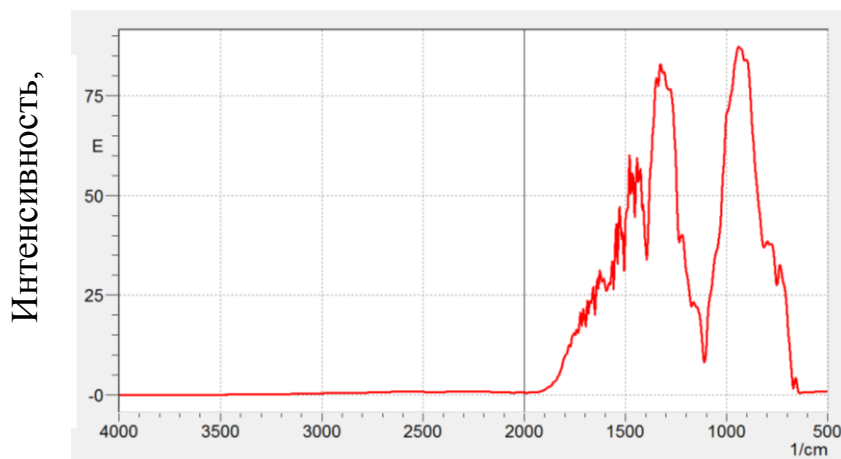


Рис. 7.6. Спектр фона (BKG) зонда IRF-D на спектрометре IR-Prestige 21 с использованием КРТ-детектора. Съемка фона: 64 скана, разрешение  $8\text{ см}^{-1}$ .  
Использован блок подключения оптоволоконного зонда

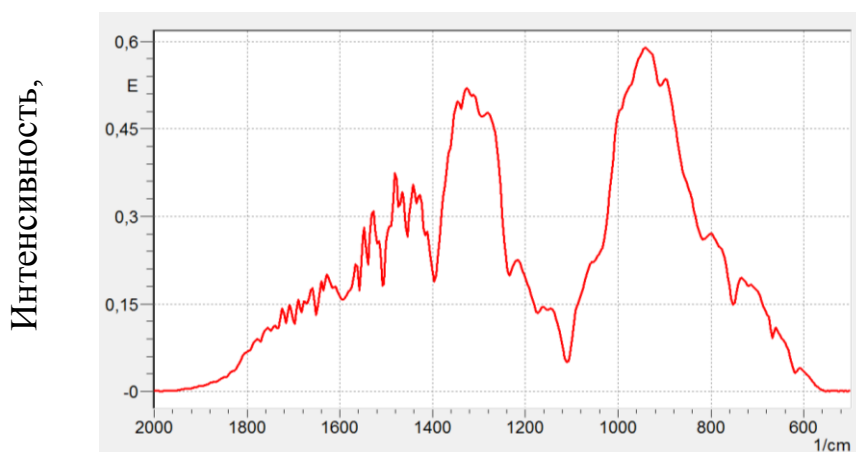


Рис. 7.7. Спектр фона (BKG) зонда IRF-D на спектрометре IR-Prestige 21 с использованием DLATGS -детектора. Съемка фона: 64 скана, разрешение  $8\text{ см}^{-1}$ .Использован блок подключения оптоволоконного зонда



Рис. 7.8. Спектр фона (BKG) зонда IRF-L на спектрометре IR-Prestige 21 с использованием КРТ-детектора. Съемка фона: 64 скана, разрешение  $8\text{ см}^{-1}$ , зонд с одинарной петлей. Использован блок подключения оптоволоконного зонда



Рис. 7.9. Спектр фона (BKG) зонда IRE-L на спектрометре IR-Prestige 21 с использованием КРТ-детектора. Съёмка фона: 64 скана, разрешение  $8\text{ см}^{-1}$ , зонд с двойной петлей. Использован блок подключения оптоволоконного зонда

Поскольку действие «зонда-петли» основано на эффекте эванесценции – частичного вытекания мод за пределы материала световода и их последующего возвращения – в той части датчика, которая имеет искривление, увеличение площади поверхности петли должно привести к увеличению интенсивности получаемого аналитического сигнала. Эксперименты с двойной петлей показали усиление интенсивности на пике  $\text{C}=\text{O}$  группы в 2,5 раза по сравнению с одной петлей (рис. 7.10). При этом минимальная детектируемая концентрация снизилась с  $4,1 \cdot 10^{-4}$  до  $1,1 \cdot 10^{-2}$  моль / л.

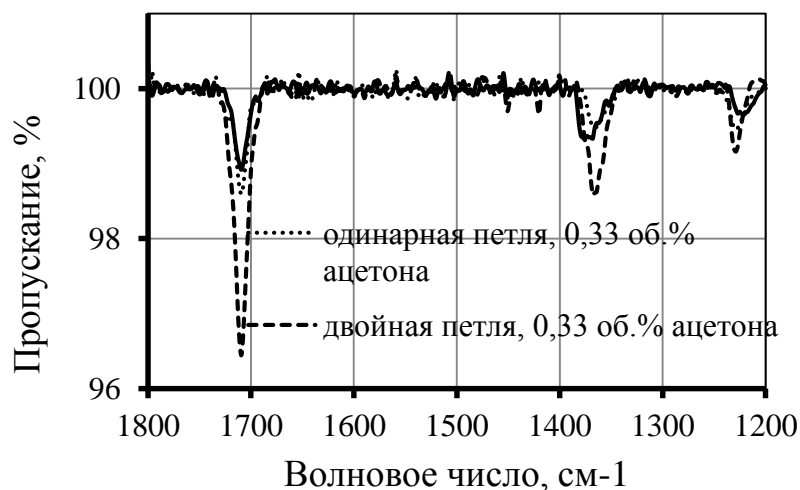


Рис. 7.10. Сравнение интенсивности полос поглощения зондов с одинарной и двойной петлей в системе «ацетон – этиловый спирт» при определении 0,33 об. % ацетона

### 7.1.2. Анализ ванн электролитов золочения

Принципиальная возможность использования волоконно-оптических систем для контроля промышленных процессов была доказана на примере исследования химического состава и концентрации растворов электролитов в реальном времени с использованием спектральных методов анализа цианистых электролитов золочения. Цианокомплексы легко идентифицируются, так как они характеризуются резкой полосой поглощения связи CN при длине волны  $2200\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ . Колебание связи CN имеет частоту  $2080\text{ см}^{-1}$  (водный раствор). При координации с металлом полоса связи CN смещается к более высоким частотам, именно этот эффект наблюдается на спектре, полученном при измерении электролита [9]. Регистрируя интенсивность пика связи CN в координации с металлом (золотом) и без него, можно анализировать содержание золота непосредственно в электролитическом растворе золочения. Благодаря диэлектрическим свойствам оптического волокна аналитический сигнал в виде инфракрасного излучения в диапазоне  $3,0\text{--}25,0\text{ мкм}$  не испытывает существенных изменений и позволяет различать концентрации с точностью до  $0,1\text{ г/л}$  по основному компоненту (золото). Работы были выполнены при использовании ИК-Фурье-спектрометра фирмы Shimadzu IR-Prestige 21, режим съемки: 64 скана, разрешение  $4\text{ см}^{-1}$ , охлаждаемый детектор КРТ (кадмий-ртуть-теллур). Способ доставки аналитического сигнала: волоконно-оптический зонд с рабочим элементом типа «призма МНПВО» (IRF-D). Материал погружной части зонда – РЕЕК (полиэфирэфиркетон – стойкий к агрессивным средам полимер), материал рабочего элемента – синтетический алмаз, для ввода аналитического сигнала от спектрометра использован блок подключения оптоволоконного зонда.

Для выполнения эксперимента были подготовлены водные растворы электролита на основе солей дицианоаурата калия в соответствии с ГОСТ 20573-75. Контроль массового содержания золота осуществляли гравиметрическим методом. Результаты измерений представлены на рис. 7.11. Интенсивность пика на длине волны  $2147\text{ см}^{-1}$  уменьшается со снижением концентрации золота в комплексе. Наблюдаемая тенденция имеет нелинейную зависимость. Дальнейшие эксперименты позволяют определить её характер. Стоит отметить, что использование эффекта эванесценции, как и в случае с первым экспериментом, позволяет минимизировать влияние поглощения связей воды в инфракрасной области. Тем не менее для исследований, касающихся



определения количественного содержания связей, стоит выбирать спектральные области, не перекрываемые интенсивными полосами поглощения воды.

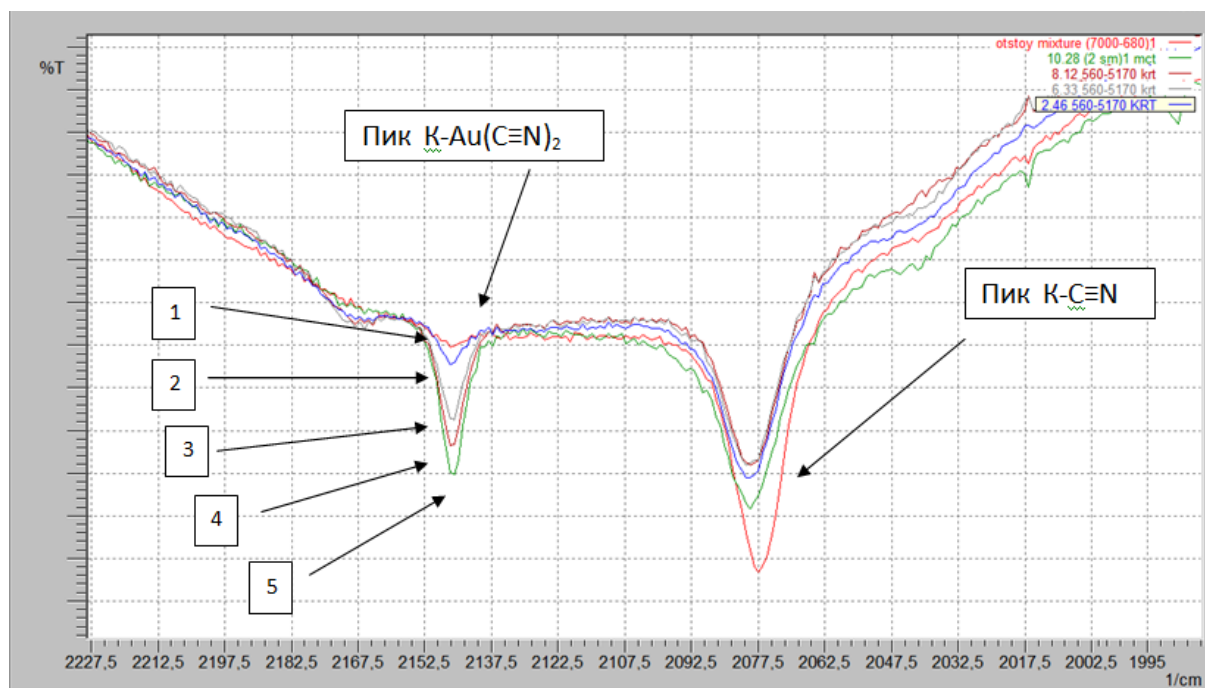


Рис. 7.11. Измерение электролитов золочения методом on-line ИК спектроскопии с различной концентрацией золота:  
1 – 1.72 г/л; 2 – 2.44 г/л; 3 – 6.68 г/л; 4 – 8.17 г/л; 5 – 9.01 г/л

В процессе промышленного золочения контролируются следующие параметры: время проведения гальванического процесса, температура нагрева рабочего электролита, сила тока. Они непосредственно влияют на качество получаемого покрытия, оказывают свое воздействие на расход и распределение золота в ванне. При этом измерение концентрации золота в рабочем растворе-электролите не может производиться постоянно. Большой интервал между проводимыми анализами приводит к неоптимальному выбору режима покрытия (режим покрытия напрямую зависит от концентрации золота в электролите), вследствие чего возможно появление брака. Спектральный метод анализа с использованием волоконно-оптических зондов позволит в режиме реального времени контролировать содержание золота в гальванических растворах золочения.

### 7.1.3. Спектрометрический метод в криминалистике с применением волоконного зонда

Для оценки пригодности использования волоконно-оптических датчиков для идентификации веществ методами ИК-Фурье-спектроскопии была выбрана задача исследования спектров чернил тонера принтера, чернил шариковой ручки и печати. Эти задачи актуальны прежде всего, для областей криминалистики, так как помогают не только идентифицировать подлинность подписи, печати или документа, но и определить в каком порядке была нанесена краска. Аналогичные задачи решаются при исследовании исторических документов и произведений искусства [10].

Ход выполнения эксперимента аналогичен работе с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) или инфракрасным микроскопом. Данные эксперименты осложняются высокой стоимостью ИК-микроскопа, а также трудностью работы НПВО-приставки с крупными образцами, в связи с чем решение задачи определения порядка нанесения чернил шариковой ручки и чернил печати становится тривиальным.

Волоконно-оптический датчик с рабочим элементом в форме усечённого конуса (материал – алмаз) позиционировался на документе, как показано на рис. 7.12, микровизор был использован для точности позиционирования МНПВО-конуса на различных областях исследуемого документа.

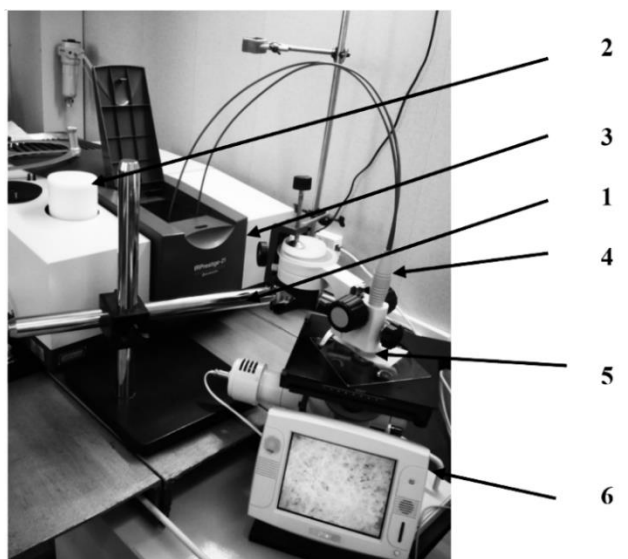


Рис. 7.12. Установка для проверки подлинности документов при помощи волоконно-оптического зонда: 1 – штатив; 2 – охлаждаемый КРТ-детектор; 3 – ИК-Фурье-спектрометр IRPrestige-21; 4 – волоконно-оптический зонд; 5 – рабочий элемент типа «конус НПВО» (материал – алмаз); 6 – микровизор

Как следует из рис. 7.13, чернила разных принтеров могут иметь различные спектры, по которым они легко идентифицируются, в данном случае исследованы спектры черного тонера двух офисных принтеров. С помощью функции Background (фонового снятия спектра) предварительно был снят спектр бумаги, для того чтобы при идентификации образцов данный спектр не влиял на анализ.

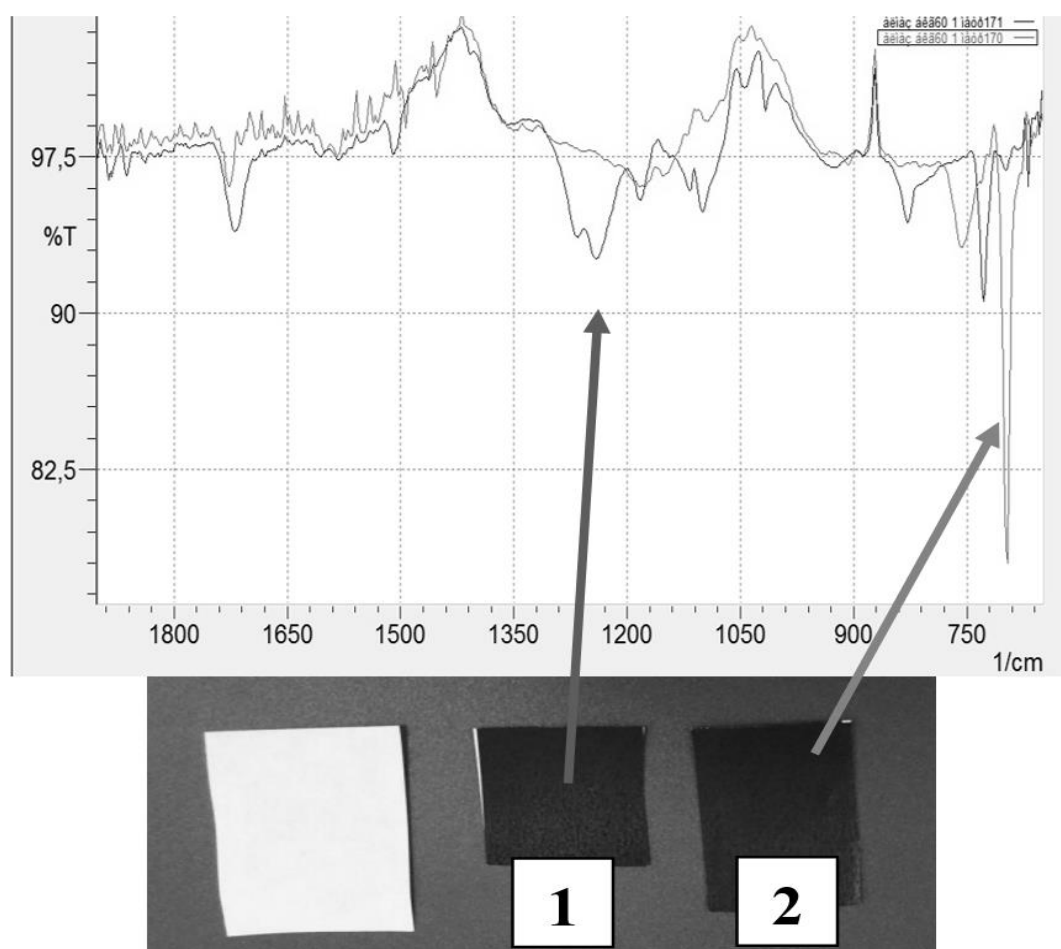


Рис. 7. 13. Спектры тонера принтера Samsung (1) и тонера принтера HP (2)

Для определения последовательности нанесения чернил достаточно произвести три измерения и затем сравнить их [8]:

- первое – спектр чернил печати;
- второе – спектр чернил шариковой ручки;
- третье – точка пересечения.

Так как толщина слоя чернил и бумаги, окрашенной чернилами шариковой ручки, превышает глубину проникновения аналитического сигнала, в случае нанесения чернил шариковой ручки поверх печати будет преобладать спектр в основном от чернил ручки, в обратном случае (печать нанесена поверх ручки) спектр будет менее интенсивным,

чем в сравнении со спектром (шариковой ручки) вне пересечения (рис. 7.14).

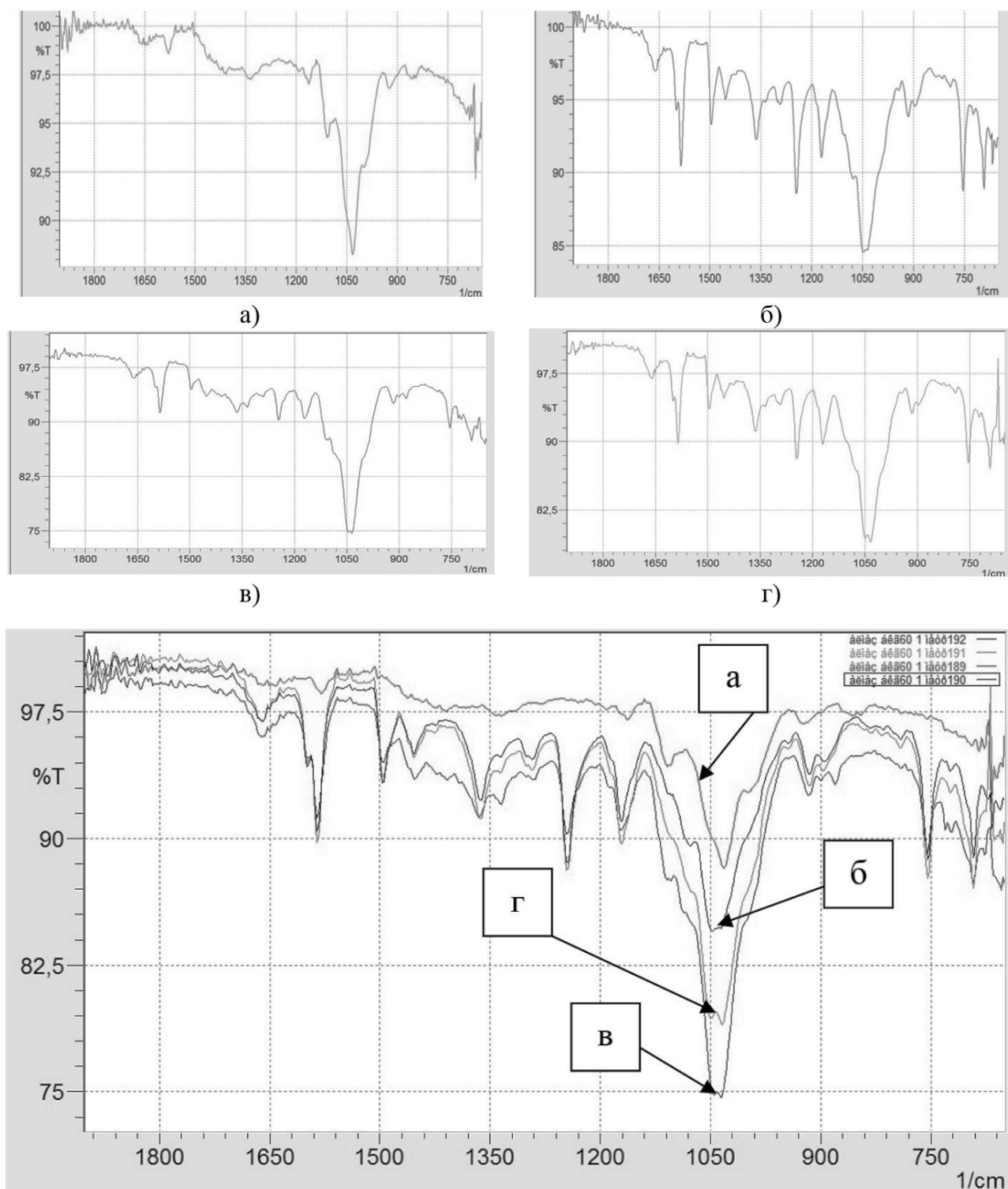


Рис. 7.14. Спектры чернил печати и шариковой ручки: а – печать; б – шариковая ручка; в – печать поверх шариковой ручки; г – шариковая ручка поверх печати

Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность применения данной системы для задач криминалистики и изучения исторических документов. Этот метод позволяет идентифицировать различные типы чернил принтера, чернил ручки и печати. К тому же он позволяет определить последовательность пересечения штрихов чернил ручки и печати путем снятия спектра поверхностного слоя. Это измерение не разрушает документ и не требует подготовки образца, а также прост в применении.

#### ***7.1.4. Анализ водных растворов метанола***

Основной проблемой анализа воды и водных растворов стандартными методами ИК-спектроскопии является значительное поглощение в диапазоне от 2 мкм и далее в ИК-область. Однако, как отмечено в работе [11], использование эффекта эванесценции позволяет обеспечить чувствительность до  $10^{-3}$  моль/л за счет многократного взаимодействия аналитического сигнала с исследуемой средой. Пластичность инфракрасных кристаллов на основе твердых растворов галогенидов серебра, в том числе модифицированных (система AgBr – TII), позволяет изготавливать эффективные оптические элементы, которые работают по принципу нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО).

Рассмотрим эксперимент по использованию НПВО-зонда для исследования водного раствора метанола. Исследования были выполнены при использовании ИК-Фурье-спектрометра фирмы Shimadzu IRPrestige 21, режим съемки: 64 скана, разрешение  $4\text{ см}^{-1}$ , охлаждаемый детектор KPT. Способ доставки аналитического сигнала: волоконно-оптический зонд с рабочим элементом «петля МНПВО». Материал погружной части зонда – РЕЕК, материал рабочего элемента – поликристаллическое волокно на основе системы AgBr – TII, для ввода аналитического сигнала от спектрометра использован блок подключения оптоволоконного зонда [12]. Для оценки возможности измерения концентрации метанола в водных растворах были измерены спектры воды и метанола. Выполнено сравнение спектра метанола с библиотекой спектров прибора (рис. 7.15). Характеристические пики метанола проявляются в областях от  $3000$  до  $2700\text{ см}^{-1}$  и  $1000\text{ см}^{-1}$ . В связи с тем, что наибольшей интенсивностью отличается пик, лежащий в области  $1000\text{ см}^{-1}$ , его можно рассматривать как калибровочный, к тому же данный пик незначительно перекрывается пиками воды.

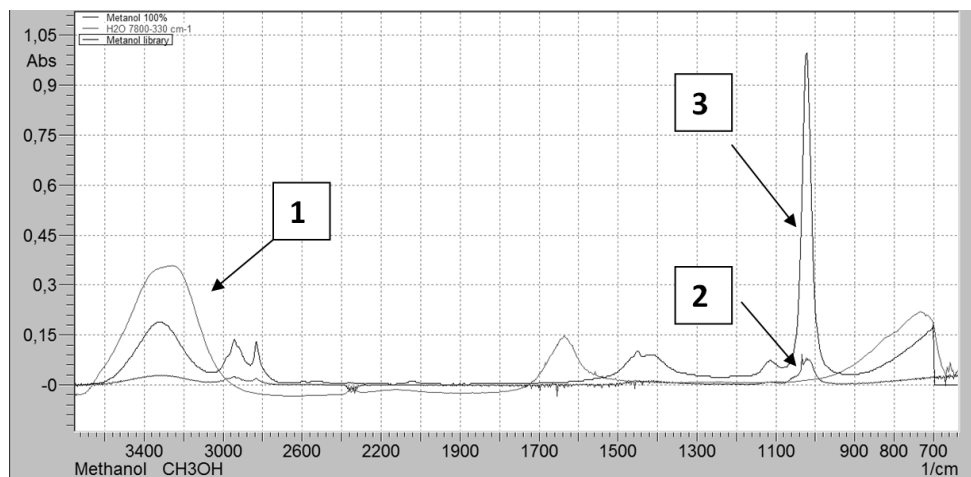


Рис. 7.15. Определение характеристических полос поглощения воды и метанола с использованием волоконно-оптического зонда IRF-L. 1 – спектр воды; 2 – спектр метанола получен с использованием IRF-L; 3 – спектр метанола из библиотеки спектрометра IRPrestige 21

После определения калибровочного пика были выполнены измерения с использованием волоконно-оптического зонда типа «петля». Методика эксперимента заключалась в помещении подключенного к спектрометру зонда в дистиллированную воду и поэтапном добавлении метанола. Объем воды – 50 мл, порции добавленного метанола обеспечили концентрацию в 1 об.% и 2 об.%. Условия съемки – диапазон от 1250 до 725  $\text{см}^{-1}$ , приемный датчик спектрометра – охлаждаемый КРТ-детектор (рис. 7.16). Разница между интенсивностью полученных пиков значительная, что позволяет говорить о хорошем разрешении метода.

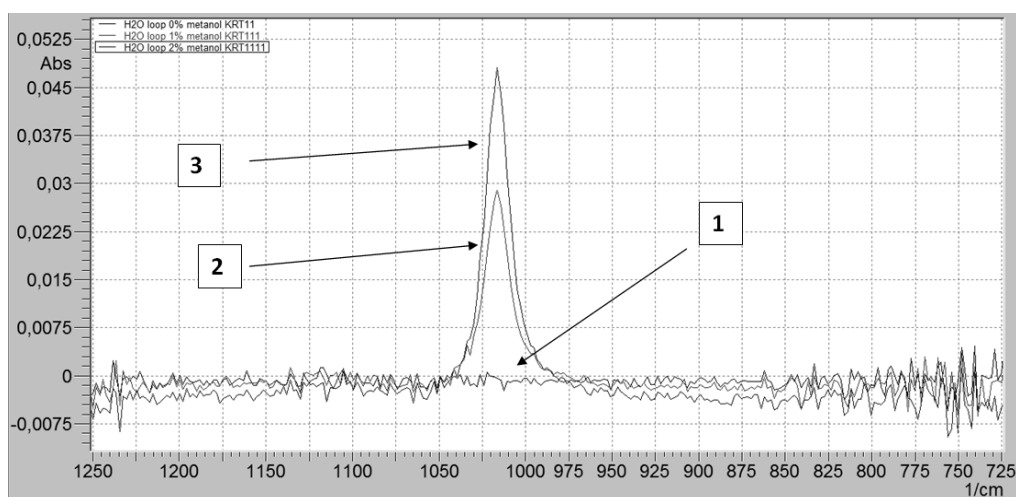


Рис. 7.16. Результаты измерений с использованием волоконно-оптического зонда: 1 – нулевая линия, чистая вода; 2 – пик метанола, концентрация 1 об. %; 3 – пик метанола, концентрация 2 об.%

Методика измерений с помощью НПВО-приставки заключается в размещении на кристалле ZnSe капли раствора и последующей съёмке спектра. На рис. 7.17 представлен спектр чистого метанола и спектр водного раствора с 2 об.% метанола. В обоих случаях фоном измерений была бидистиллированная вода, остальные условия съёмки аналогичны условиями предыдущего опыта. Наблюдаемый наклон в правой части спектра чистого метанола (красная линия) связан с дефицитом воды. На рис. 7.18 приведено сравнение чувствительности методов.

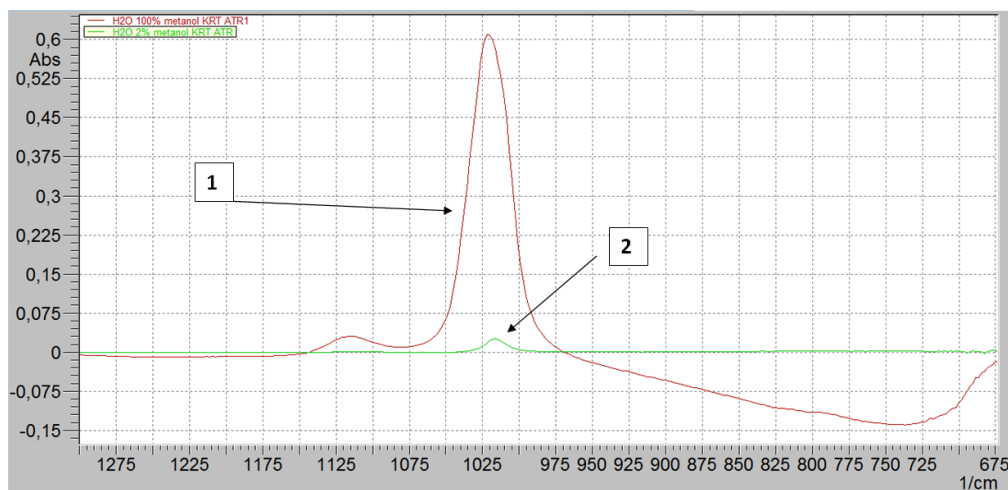


Рис. 7.17. Результат измерений с использованием НПВО-приставки фирмы Спесас: 1 – метанол 100 об.%; 2 – водный раствор метанола 2об.%

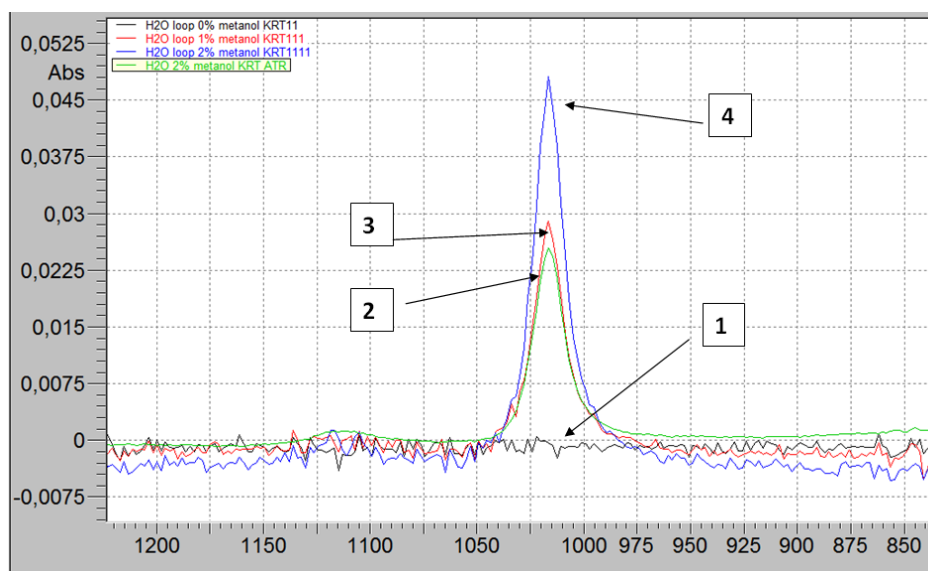


Рис 7.18. Сравнение чувствительности методов с использованием НПВО-приставки и волоконно-оптического зонда «петля»: 1 – нулевая линия (BKG) воды; 2 – пик метанола с концентрацией 2 об.% измерен на НПВО-приставке; 3 – пик метанола с концентрацией 1 об.% и 4 – пик метанола с концентрацией 2 об.% измерены волоконно-оптическим зондом «петля»

Установлено, что использование волоконно-оптического зонда позволяет набирать в 2 раза более интенсивный сигнал на чувствительном элементе «петля», изготовленном из поликристаллического волокна на основе твердых растворов системы  $\text{AgBr} - \text{Ti}$ . При этом стоит отметить, что интенсивность проходящей фоновой энергии в НПВО приставке Spresac в 65 раз превышает интенсивность энергии, проходящей через волоконный зонд, при сохранении одинаковых соотношений сигнал/шум для интересующего диапазона длин волн  $1100\text{--}850\text{ см}^{-1}$ . Наблюдаемое повышение чувствительности связано с увеличением площади точек контакта выходящего излучения на «петле», в то время как на приставке НПВО такая точка только одна. Использование оптических элементов сложной формы, реализующих принципы МНПВО, позволяет эффективно измерять химический состав водных растворов веществ, преодолевая значительное поглощение воды в инфракрасной области спектра.

#### **7.1.5. Определение количества влаги в трансформаторном масле**

На сегодняшний день рынок спектральных датчиков для анализа жидкостей и газов является одним из наиболее перспективных и развивающихся среди отрасли контрольно-измерительных приборов в связи с малыми габаритами, высокой точностью, быстротой обработки данных и пр. Во многом развитию данного сегмента рынка поспособствовало наличие широкого спектра оптических волокон и оптоволоконных датчиков на их основе. Инфракрасные волокна для среднего и дальнего ИК-диапазонов являются наименее распространенными в области КИПиА в связи с большими оптическими потерями, малой фотостойкостью и хрупкостью. Модифицированные галогениды серебра и световоды на их основе являются уникальным оптическим материалом, так как обладают широким диапазоном прозрачности: для кристаллов –  $0,5\text{--}35,0\text{ (}60,0\text{)}\text{ мкм}$ , для световодов – от  $2,0$  до  $25,0\text{ мкм}$ , высокой фотостойкостью, прочностью, устойчивостью к радиации, а также малыми оптическими потерями (до  $0,1\text{ дБ/м}$ ) [1-5, 13,14].

Световоды, изготовленные на основе галогенидов серебра, могут быть применены в различных областях науки и техники, одной из которых является использование волоконной сборки для исследования обводненности трансформаторного масла. Принцип работы датчика основан на методе инфракрасной спектроскопии. Данная методика



позволяет производить измерения с высокой точностью в реальном времени путем регистрации спектральных характеристик масла и воды. Датчик позволяет измерять интенсивность оптического сигнала на выбранных длинах волн, соответствующих пикам поглощения воды и трансформаторного масла.

По спектрам на рис. 7.19 определяются пики воды в ближнем и среднем ИК-диапазоне: 1,45; 1,90; 3,00; 6,00 мкм, и пики масла: 1,72; 3,50; 6,80, а также нулевой пик 1,60 мкм, в котором не поглощаются оба вещества. Последняя длина волны является нулевой отсечкой для отсчета высоты пиков жидкостей. В качестве источника излучения используется широкополосная ИК-лампа, охватывающая весь исследуемый диапазон, а выделение конкретных пиков выполняется с помощью оптических фильтров для выбранных длин волн, которые показаны на рис. 7.20.

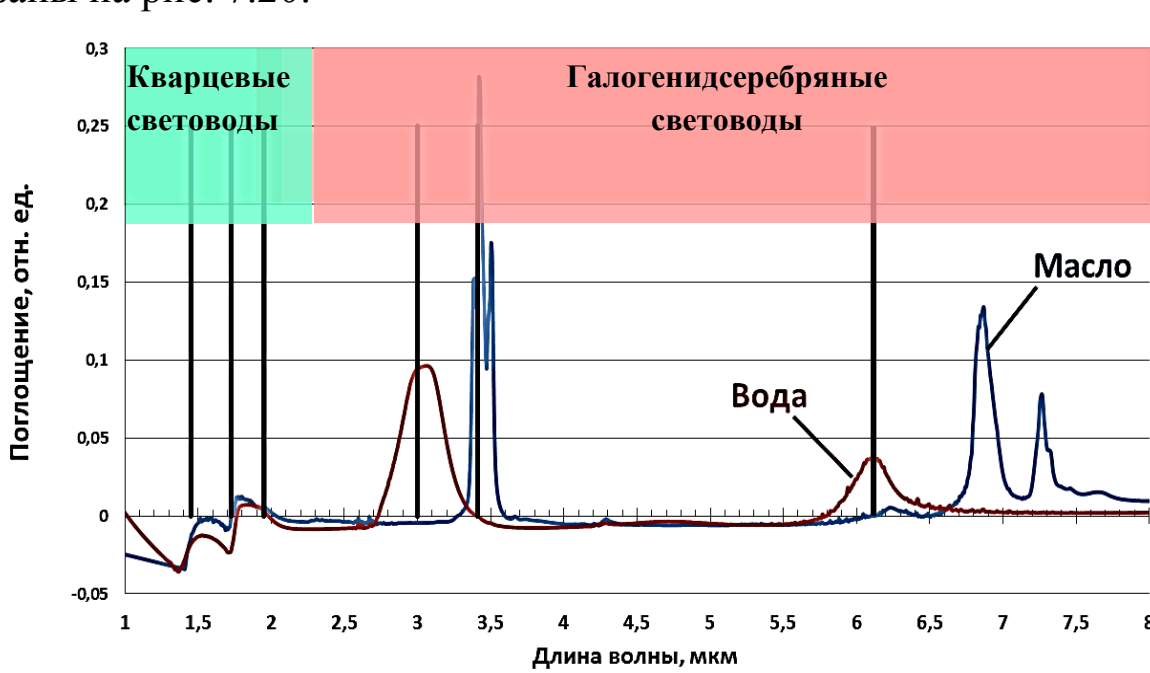


Рис. 7.19. Спектральные характеристики трансформаторного масла и воды при инфракрасном излучении длиной волны от 1 до 8 мкм с указанием типов световодов, пропускающих в ближнем и среднем ИК-диапазонах

Особенностью волоконно-оптического датчика является помехозащищенность, которая достигается совокупностью двух факторов: излучение ИК-диапазона не подвергается ЭМ-помехам за счет более высокой энергии; волоконная сборка изготавливается из диэлектрических материалов, таким образом, ЭМ-поле трансформатора не искажает оптический сигнал, а длина сборки позволяет вынести электронную часть на необходимое расстояние от помех. Объединение данных

свойств позволяет применять данный датчик для трансформаторов любой мощности.

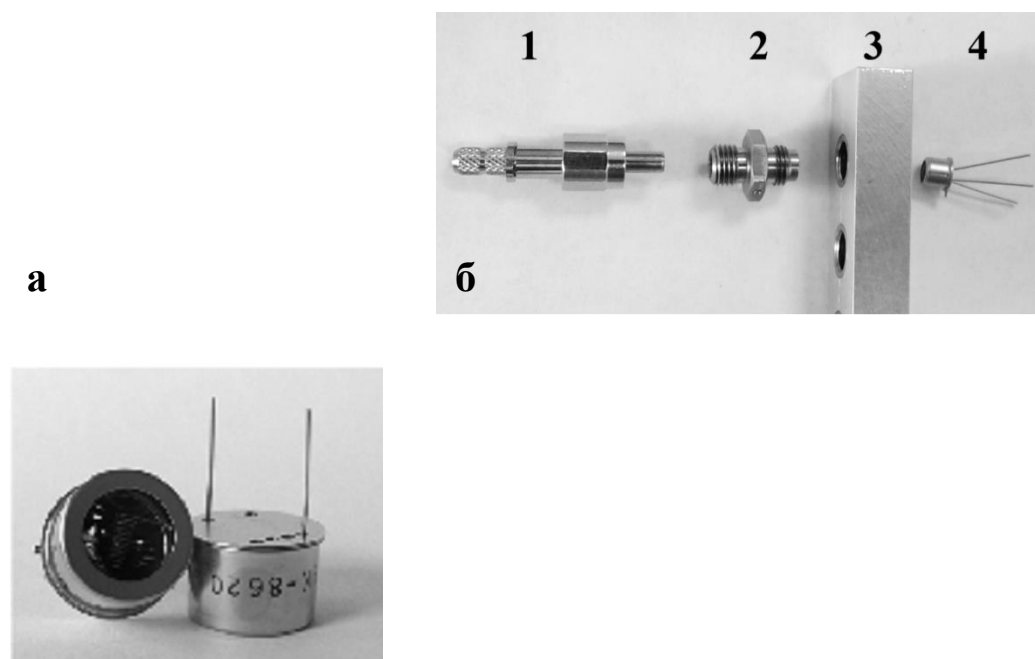


Рис. 7.20. Элементы оптической схемы датчика влаги: а – широкополосный источник ИК-излучения, б – фиксация оптического фильтра: коннектор SMA-905 (1); оптический фильтр в держателе (2); корпусная часть (3); фотодиод (4)

Для осуществления помехозащищенности датчика вся электроника должна быть удалена от трансформатора. В соответствии с данным требованием определяется оптическая схема устройства и проектируется электронный блок приема излучения. Например, источник излучения может быть удален от ЭМ-помех к основной электронной части, таким образом, волоконная сборка будет каналом доставки как просвечивающего излучения к исследуемой среде, так и оптического сигнала от масла к блоку приема, как показано на рис. 7.21. Для обеспечения такого режима работы волоконная сборка должна быть выполнена по принципу зонда нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), оптическая схема которого показана на рисунке 7.21 [15,16], в котором часть проходящего излучения поглощается средой в чувствительном элементе, выполненном в виде петли или призмы из прозрачного для ИК-диапазона кристалла.

Для датчика влаги в качестве чувствительного элемента должен быть выбран материал, инертный к исследуемой среде, неподверженный воздействию рабочих температур трансформаторного масла, прозрачный для ИК-излучения. Волоконная сборка изготавливается из

двух типов световодов: кварцевых для  $\lambda < 2$  мкм и галогенидсеребряных для  $\lambda = 2 \dots 8$  мкм, таким образом охватывая весь необходимый диапазон спектра.

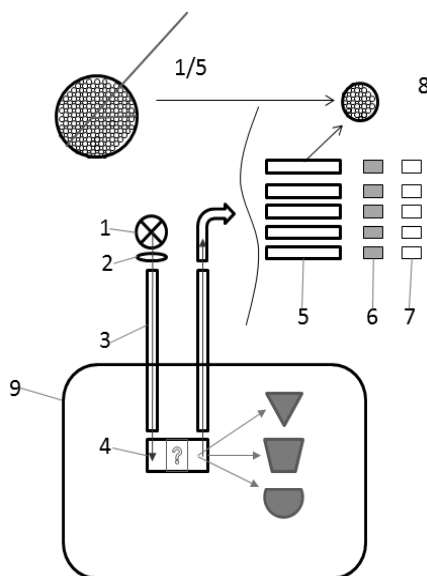


Рис.7.21. Оптическая схема датчика: 1 – источник излучения; 2 – фокусирующая линза; 3 – волоконная сборка; 4 – сапфировое окно; 5 – оптические каналы с равным количеством волокон; 6 – выходные концы сборки; 7 – оптические фильтры; 8 – матрица из приемников

Волоконно-оптический зонд должен разветвляться на отдельные каналы для подвода излучения к исследуемой среде и отвода к оптическим фильтрам и приемникам излучения (рис. 7.22).

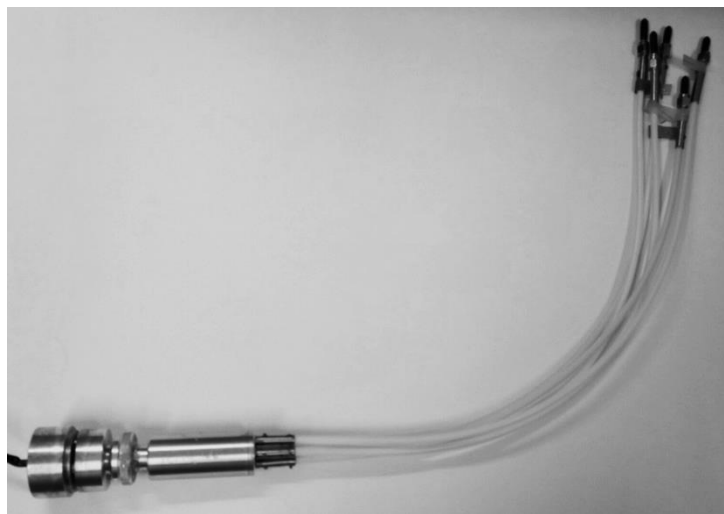


Рис. 7.22. Волоконно-оптический зонд с разветвлением на пять каналов

Основными элементами электронной части датчика являются блок питания, источник излучения, приемные фотодиоды, электронные усилители сигнала, вычислительная платформа обработки сигналов. Вычислительная платформа должна быть защищенной от помех и воздействий окружающей среды.

Инфракрасный волоконно-оптический датчик в промышленности требуется в двух исполнениях: переносном и стационарном, для использования в качестве устройства периодического и непрерывного контроля влаги соответственно.

#### ***7.1.6. Регистрация ионизирующих излучений***

Широкое развитие сцинтилляционных методов регистрации различных типов ионизирующего излучения обусловлено преимуществами сцинтилляционных детекторов над другими счётчиками излучения. В качестве неорганических сцинтилляторов наибольшее распространение получили кристаллы. Их применение основывается на следующем комплексе свойств: высокая чувствительность, особенно к  $\gamma$ -излучению, высокая температура плавления по сравнению с таковой органических сцинтилляторов, высокая скорость счёта и временная разрешающая способность, возможность использования счетчиков различных геометрических форм и размеров, обусловленных специальными условиями изготовления.

Однако одним из перспективных направлений является использование вместо сцинтилляционных кристаллов – волокна, поскольку длина поликристаллического световода может достигать десятков метров. Сердцевину и оболочку волоконных сцинтилляторов изготавливают методом экструзии (выдавливания) из новых монокристаллических заготовок на основе твердых растворов галогенидов серебра  $\text{AgCl}_x\text{Br}_y\text{I}_{1-x-y}$ , легированных йодидом одновалентного таллия (Tl). Состав сердцевины имеет больший по сравнению с оболочкой показатель преломления ввиду повышенного содержания Tl, поэтому сцинтилляционное излучение преломляется на границе раздела сердцевина – оболочка и распространяется по сердцевине практически без потерь. Определенное содержание Tl в волокне обеспечивает наличие полосы люминесценции в диапазоне длин волн от 550 до 850 нм с максимумами свечения на 630 и 760 нм. На основе таких поликристаллических неорганических волокон было разработано три типа сцинтилляционных датчиков, представленных в табл. 7.1

Кристаллический сцинтиллятор «Лия-1» [17] имеет максимум спектра люминесценции в районе 400 нм, полуширина 90 нм. В кристаллическом неорганическом сцинтилляторе «Лия-2» таллий находится в кристаллах на основе твердых растворов галогенидов серебра как примесь, поэтому он может присутствовать в виде любого галогенида. Такой состав обеспечивает максимум спектра свечения 400 нм и время высвечивания 20 нс. Световыход  $\alpha$ -сцинтилляций (плутоний – 229)  $\sim 40\%$  относительно световыхода стилибена при эффективном атомном номере 42,7 и плотности  $6,4 \text{ г / см}^3$  [18]. Сцинтиллятор «Лия-3» [19] чувствителен к пучкам рентгеновского и электронного излучения и может применяться для визуализации излучений в системах радиационного мониторинга, таможенного контроля, в системах томографии и неразрушающего контроля, использующих фотоприемные устройства, чувствительные в красном диапазоне спектра, в том числе компактные устройства на базе PIN-фотодиодов. Спектр свечения сцинтиллятора сосредоточен в основном в красной и ближней ИК-области спектра от 575 до 820 нм (по полувысоте полосы свечения) с максимумом спектра свечения 740 нм. Время высвечивания 15 нс на длине волны около 570 нм; диапазон пропускания от 0,4 до 27 мкм; эффективный атомный номер 45,7–45,75; плотность  $6,6 \text{ г/см}^3$ . Световыход на уровне 6–10 % относительно световыхода сцинтиллятора CsI(Tl), используемого в голландской разработке сцинтилляционного детектора с фотодиодной регистрацией. Тем не менее; амплитуда сцинтилляционной вспышки сцинтиллятора более чем достаточна для надёжной регистрации PIN-фотодиодом, и предлагаемый сцинтиллятор более эффективен в фотодиодных сборках, нежели CsI (Tl). Он превышает нагрузочную способность последнего более чем в 10 раз [19].

Помимо вышеупомянутых запатентованных составов сцинтилляторов, разрабатываются новые также на основе твердых растворов галогенидов серебра. Их сцинтилляционные свойства измеряются по схеме, представленной на рис. 7.23. Образец помещается в кюветное отделение рентгеновской установки (УРС-01) и подвергается воздействию излучения энергией 150 кэВ, длительность импульса 1 нс. Сцинтилляционное излучение попадает в световод (материал  $\text{SiO}_2$  либо  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ ), далее излучение фокусируется линзой (материал  $\text{SiO}_2$  либо  $\text{ZnSe}$ ) на призму (материал  $\text{SO}_2$  либо  $\text{KBr}$ ) и затем регистрируется КРТ-приёмником,двигающимся по радиусу (рабочий диапазон работы 0,5 – 16 мкм; соотношение сигнал : шум 1 : 100 000). В качестве

эталонных сцинтилляционных материалов можно использовать  $\text{Er} : \text{YAG}$  и  $\text{Yb} : \text{YAG}$ . При применении такой схемы можно наблюдать за кинетикой процесса сцинтилляции.

Новый состав с 5 мол. %  $\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$  в  $\text{AgBr}$ , снятый с использованием  $\text{SiO}_2$ -световода (прозрачен от 200 до 1200 нм) сцинтиллирует в диапазоне от 500 до 800 нм. Данная схема собрана в научно-образовательном центре «Наноматериалы и нанотехнологии» совместно с доцентом А.В. Ищенко.

Таблица 7.1

Кристаллические неорганические сцинтилляторы на основе твердых растворов галогенидов серебра [17,18, 20].

Кристаллический неорганический сцинтиллятор	Содержание, мас. %				
	AgCl	AgBr	Активирующая добавка		
			AgI	Tl	Eu, Ce, Tl
ЛИЯ-1	23,95	76,00	0,05	—	—
ЛИЯ-2	23,94	76,00	0,05	—	Один из указанных галогенидов металлов в количестве 0,01
Сцинтилляционный световод	20,00	79,49	0,50	—	
ЛИЯ-3	18,00	74,00	1,00	7,00	—

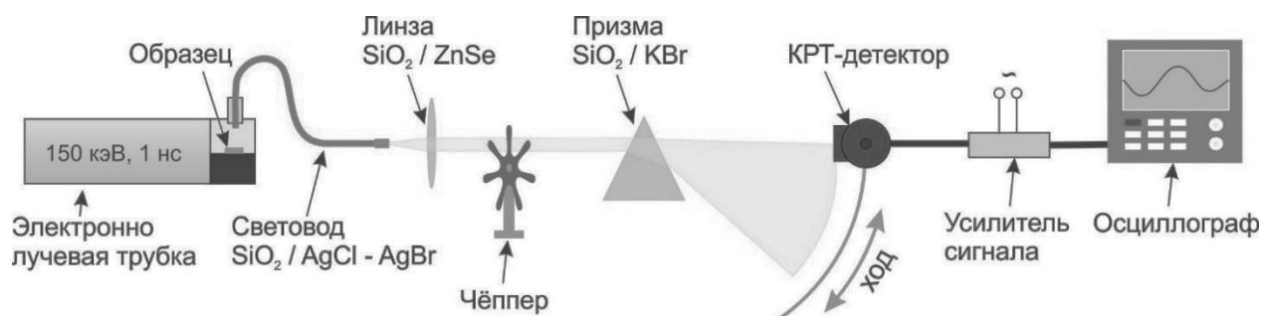


Рис. 7.23. Схема исследования сцинтилляционных свойств материалов  $\text{AgBr} - (\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54})$

### 7.1.7. Лазерная медицина

ИК-световоды на основе галогенидов серебра открывают перспективы для создания методик полностью автоматических медицинских операций, примером чему могут являться реализуемые в настоящее время методики по лечению варикозного расширения вен. При воздействии лазерного излучения на органические ткани важными па-

раметрами являются: плотность мощности лазерного излучения, глубина его проникновения, числовая апертура (NA) при одномодовом режиме работы. Особую значимость эти параметры приобретают при выполнении инвазивных операций. Щадящий режим воздействия на ткани излучения углекислотного лазера, глубина проникновения которого составляет от 20 до 50 мкм [21], делает его использование предпочтительным при выполнении сложных хирургических операций по сравнению с другими лазерами, работающими в видимой и ближней инфракрасной области спектра (рис. 7.24).

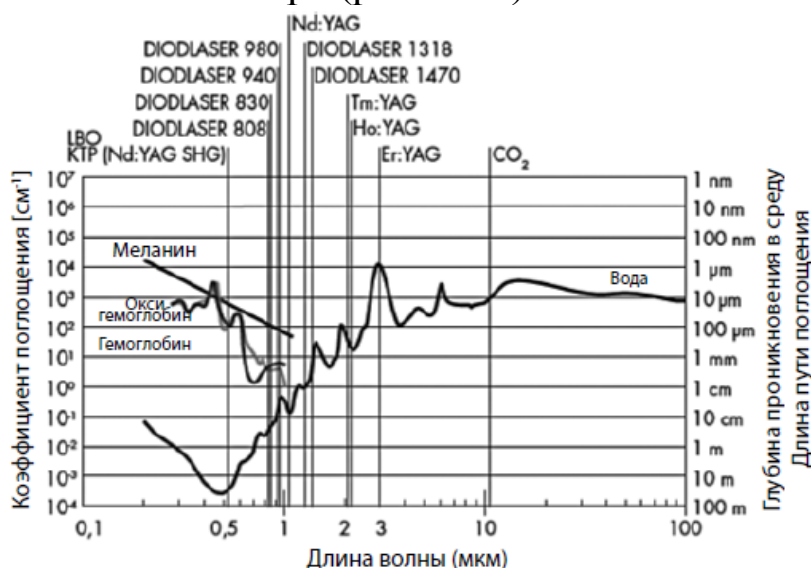


Рис. 7.24. Зависимость глубины проникновения лазерного излучения в биоткань от длины волны [21]

Излучение этих лазеров передается по кварцевому волокну и значительно глубже проникает в органическую ткань, в том числе здоровую, травмируя её. Например, глубина проникновения в органические ткани излучения гольмиевого ИАГ-лазера с длиной волны 2,09 мкм составляет 0,5 мм, излучение диодных лазеров с длиной волны 0,81 мкм проникает на глубину от 4 до 6 мм [21].

Оптические волокна, как составные части медицинских изделий, в зависимости от вида выполняемых манипуляций могут подвергаться дезинфекции, предстерилизационной очистке и стерилизации [22, 23]. Существующие на сегодняшний день медицинские CO<sub>2</sub>-лазеры используют для проведения открытых поверхностных (рис. 7.25) или лапароскопических эндоскопических хирургических операций. Торцы разрабатываемых инфракрасных волокон для таких медицинских лазеров могут соприкасаться с поврежденной слизистой оболочкой, контактировать с кровью и инфекционными препаратами, а значит, они подлежат обязательной стерилизации. Среди широкого ассортимента

методов предварительной очистки и дезинфекции наиболее предпочтительными являются химические методы [23].



Рис. 7.25. Хирурги выполняют операцию с помощью специального CO<sub>2</sub>-лазера [24, 25]

Исследования показали, что оптимальным путем для стерилизации волокон на основе галогенидов серебра является химическая стерилизация, поскольку даже десятикратная стерилизация в растворе 6% перекиси водорода и выдержки в течение 360 мин не оказывает влияния на оптические свойства волокна в отличие от других видов стерилизации (рис. 7.26). Следует отметить, что пропускаемая через ИК-световоды состава AgCl – AgBr плотность мощности на длине волны 10,6 мкм составляет более 60 кВт/см<sup>2</sup>, поэтому эти световоды без проблем могут передавать излучение 30 Вт медицинских CO<sub>2</sub>-лазеров.

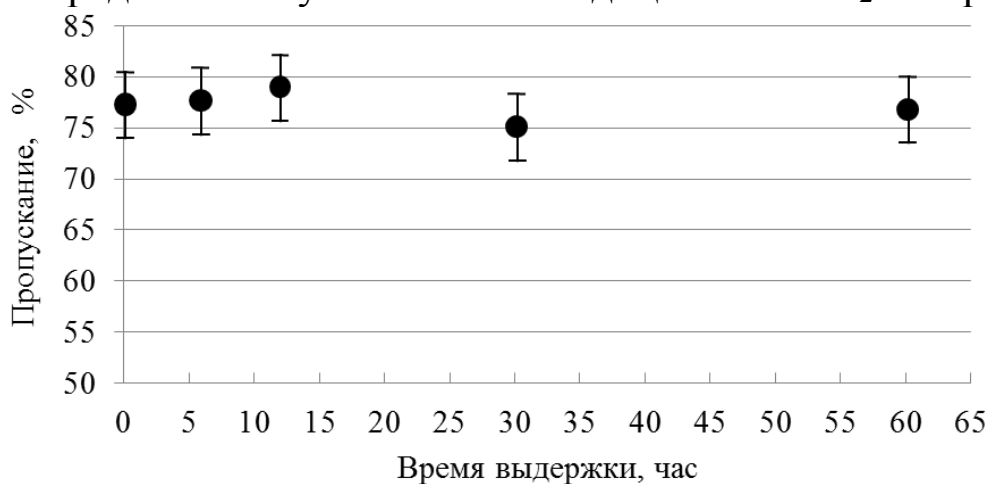


Рис. 7.26. Влияние химической стерилизации 6% раствором перекиси водорода на пропускание инфракрасных волокон

Использование данного волокна в качестве канала доставки лазерного излучения позволит вывести на новый уровень целый класс медицинских лазеров, работающих в диапазоне от 3 мкм до 10,6 мкм, путём замены зеркально-шарнирного рукава на длинный и гибкий



волоконно-оптический канал доставки лазерного излучения (рис. 7.27).

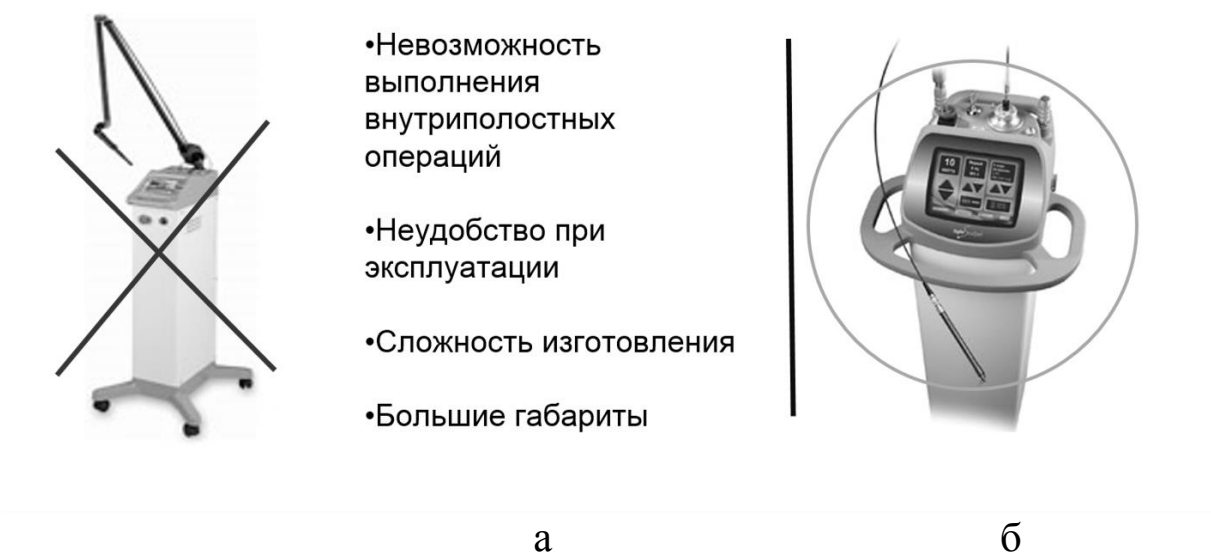


Рис. 7.27. Сравнение каналов доставки лазерного излучения: зеркально-шарнирный семиколенчатый рукав (а); волоконно-оптический канал (б)

#### **7.1.8. Низкотемпературная ИК-пирометрия**

Следующим перспективным применением инфракрасных оптических волокон является решение задачи по визуализации распределения теплового поля в диапазоне температур от  $-150$  до  $+900$  °С от удаленного изолированного объекта. Развитие технологий изготовления сборок с высоким разрешением позволит расширить возможности для контроля распределения температурных полей на ответственных технологических этапах в металлургической промышленности – сварка, кузнечно-прессовое производство, энергетике – контроль прогрева турбинных лопаток при запуске, измерение температуры теплоносителя в атомной промышленности. Волоконно-оптические сборки из кристаллов, прозрачных в спектральном диапазоне  $2 - 25$  мкм, получают значительное преимущество перед широко известными кварцевыми волокнами в области низкотемпературной пирометрии (рис. 7.28, 7.29).

Волоконно-оптический пирометр можно использовать в качестве средства дополнительной визуализации; данное устройство может с успехом заменить эндоскопы, используемые для подтверждения диагнозов заболеваний ЖКТ. Помимо этого, данное оборудование может быть использовано для проведения тепловой дефектоскопии, контроля качества сварных швов, измерения и анализа тепловых параметров внутри трубопроводов и множества других применений.



Рис. 7.28. Пересчет температуры образца на длину волны, согласно закону Вина [25]

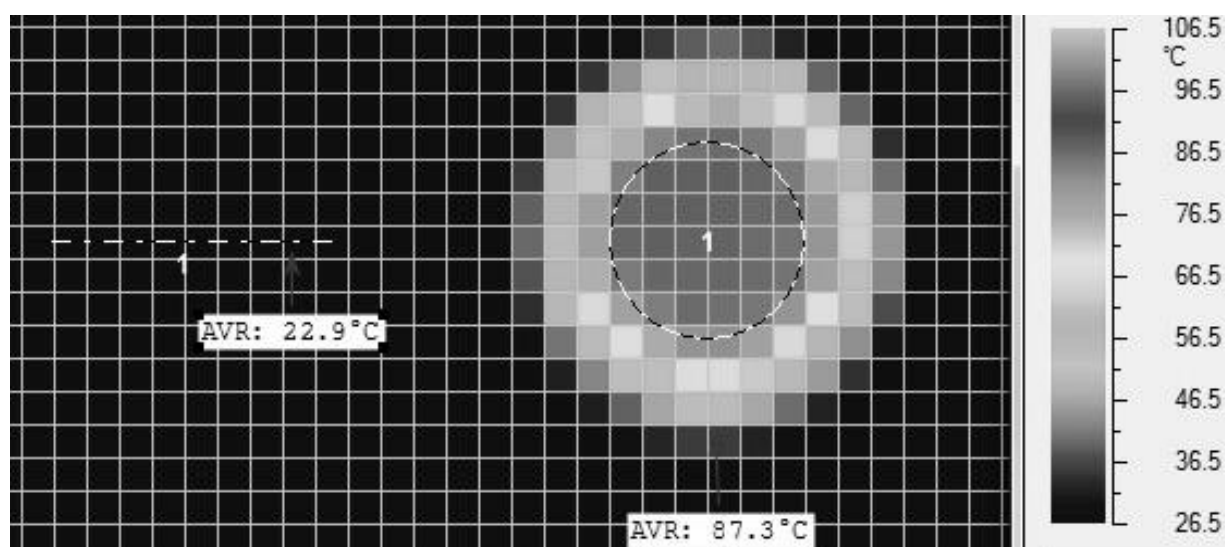


Рис. 7.29. Изображение торца световода, полученное с помощью тепловизора, при температуре источника теплового излучения 127,7 °C [26]

Для создания волоконных низкотемпературных пирометров необходимо провести предварительное исследование факторов, влияющих на эффективность и механическую прочность: зависимость пропускания волокна от диаметра волокон, радиуса изгиба, от типа оболочки и изоляции световода.

Рассмотрим ряд экспериментов по исследованию пропускания ИК-излучения по волокнам состава  $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$  различных геометрических размеров. Для исследования была собрана экспериментальная установка, представленная на рис. 7.30.

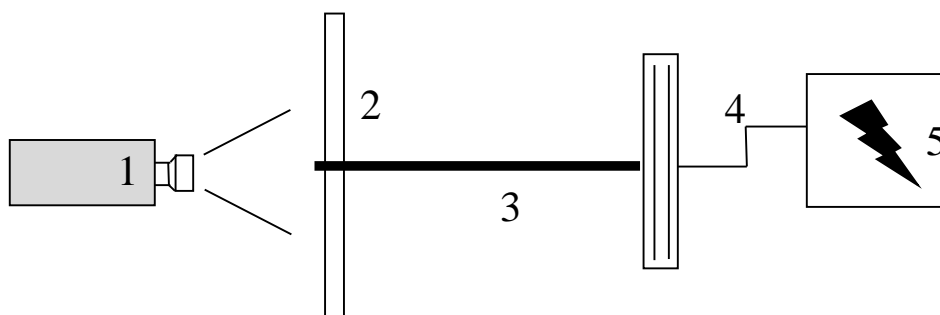


Рис. 7.30. Схема эксперимента по исследованию передачи теплового излучения: 1 – тепловизор, 2 – экран, 3 – ИК-световод, 4 – элемент Пельтье, 5 – источник постоянного тока

Концы ИК-световода жестко закрепляются для обеспечения неподвижности волокна в горизонтальном положении. Для исследования были взяты однослойные волокна с диаметрами 0,50; 1,12; 1,75 мм. Напротив первого торца световода на фиксированном расстоянии располагался элемент Пельтье, подключенный к источнику постоянного тока. Изменение величины напряжения, подаваемого на элемент Пельтье (образец), позволяет изменять температуру поверхности в диапазоне 300-400 К. Второй торец световода остается открытым (свободным), на расстоянии 20 см от торца располагается тепловизор Testo-876.

В экспериментах нагретая поверхность элемента Пельтье является источником инфракрасного (теплового) излучения. Все измерения необходимо проводить при постоянных значениях температуры образца. В процессе нагрева и охлаждения образца показания не снимались. Объектив тепловизора был сфокусирован на свободном торце световода и фиксировал тепловое поле на выходе из волокна при изменении температуры образца.

Первый этап исследования заключается в измерении температуры свободных торцов световодов различных диаметров при температурах образца  $T$  313, 333, 353, 373, 393 К. Результаты измерений температуры теплового изображения на свободном торце световода  $T_s$ , регистрируемой тепловизором, в зависимости от температуры излучающей поверхности  $T_w$  представлены на рис. 7.31.

Полученные данные показывают, что торцы световодов с диаметрами 1,12 и 1,75 мм имеют примерно равные температуры тепловых изображений, что свидетельствует о независимости пропускания от диаметра световодов при прочих равных условиях. ИК-световод с диаметром 0,50 мм показал существенно меньшие температуры тепловых

изображений, причиной чего являются большие оптические потери во всем спектральном диапазоне (до 60%) и невозможность фокусировки из-за малого диаметра торца.

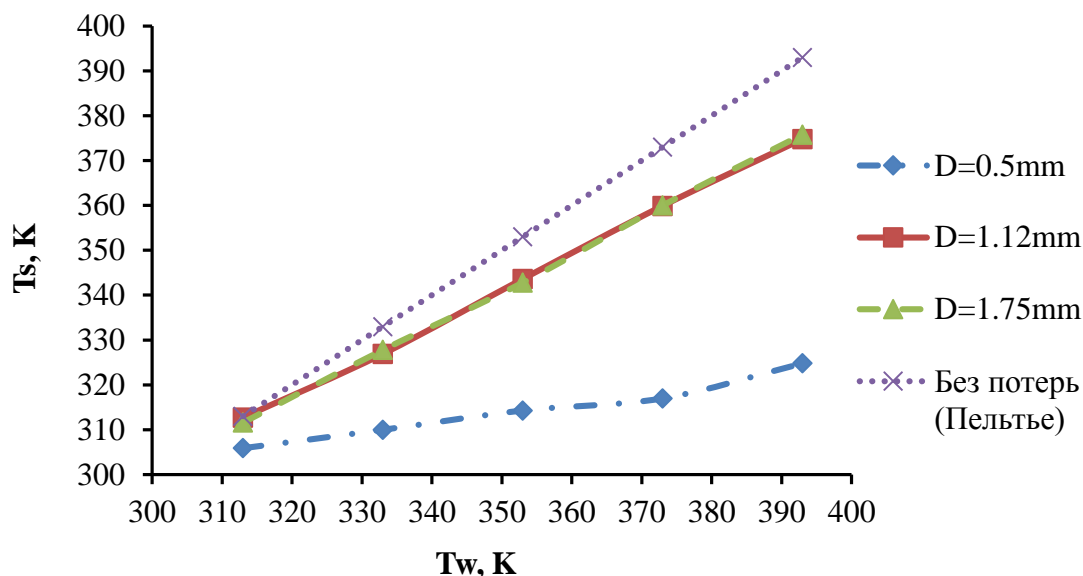


Рис. 7.31. Температура теплового изображения на свободном конце световода  $T_s$  при различной температуре поверхности образца  $T_w$

Для дальнейших исследований зависимости пропускания ИК-излучения от типа изоляции и потерь энергии от радиуса изгиба использовался световод с диаметром 1,12 мм.

Для исследования влияния типа изоляции на пропускание были выбраны: светоотражающий материал – алюминиевая фольга, светоизолирующий – фторопласт, теплоизолирующий – пенопласт и комбинированный – изолон. Для оценки полученных результатов, в соответствии с теорией радиационного теплообмена применялось следующее соотношение:

$$\theta = \frac{(T_s)^4 - (T_f)^4}{(T_w)^4 - (T_f)^4} 100\%, \quad (7.1)$$

где  $\theta$  – доля пропускания (%),  $T_w$  – температура образца,  $T_s$  – температура, регистрируемая тепловизором,  $T_f$  – температура фона (К).

Результаты обработки экспериментальных данных по (7.1) для каждого из типов изоляции представлены на рис. 7.32 в виде логарифмических зависимостей  $\ln(\theta(T_w))$ .

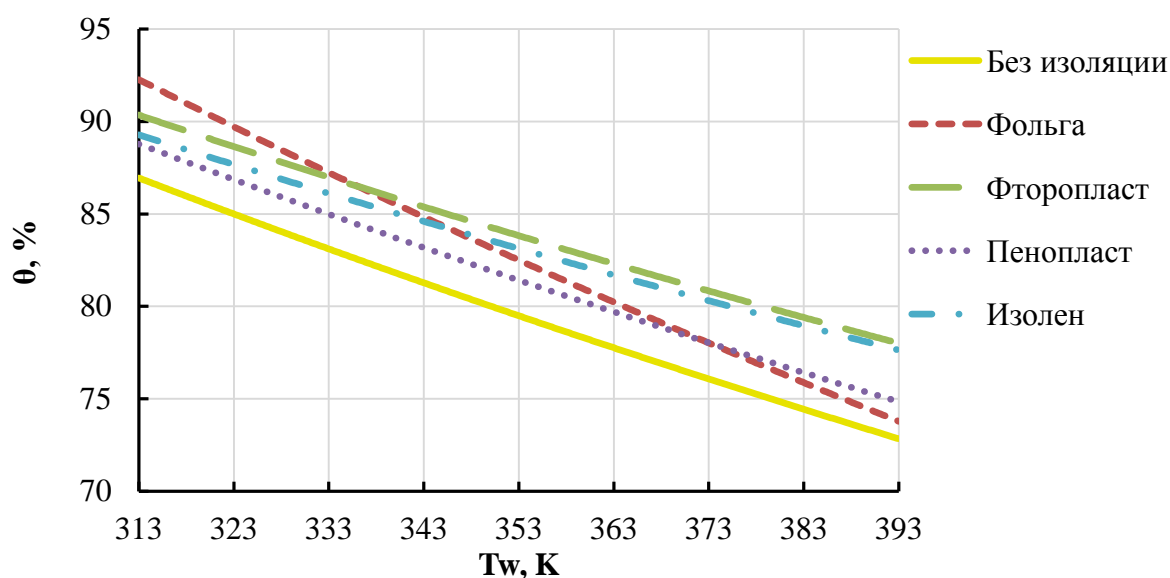


Рис. 7.32. Логарифм пропускания ИК-излучения  $\theta$  при температуре поверхности образца  $T_w$  для разных типов изоляционного материала

По рис. 7.32 видно, что пропускание изолированного световода выше, чем неизолированного. Из рассматриваемых видов изоляции в области до 333К наиболее эффективной является алюминиевая фольга, представляющая собой светоотражающее покрытие. При средних температурах 333-385К наибольшее пропускание получено при светоизолирующем материале фторопласте. В области высоких температур  $>395\text{К}$  ожидается максимальная эффективность комбинированного материала изолена. Таким образом, использование изоляционных материалов увеличивает долю переданной тепловой энергии, однако выбор того или иного типа изоляции должен основываться на диапазоне передаваемых температур.

Перед экспериментальным исследованием зависимости потерь энергии от радиуса изгиба световода требуется выполнить расчет критического радиуса изгиба. Распространение ИК-излучения по однослойным и двухслойным световодам обусловлено законом полного внутреннего отражения (ПВО). При прохождении ЭМ-волны через изогнутый участок световода нарушается условие ПВО, следовательно, появляются потери энергии, достигающие своего максимального значения при критическом радиусе изгиба, который рассчитывается следующим образом:

$$R_{\text{кр}} = \frac{2n_1 n_2 d}{(n_2^2 - n_1^2)} , \quad (7.2)$$

где  $n_1$  – коэффициент преломления материала оболочки световода,  $n_2$  – коэффициент преломления материала сердечника световода,  $d$  – диаметр световода.

Для исследуемого световода диаметром  $d=1,12$  мм составом  $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$  коэффициент преломления сердечника составляет  $n_2 = 2,2$ . Коэффициент преломления оболочки соответствует коэффициенту преломления воздуха  $n_1 = 1$ . Таким образом, критический радиус изгиба по (7.2) равен 1,38 мм.

В экспериментальных исследованиях потерь тепловой энергии при различных радиусах изгиба температура образца и длина световода были постоянными:  $T_w=373$  К,  $L=15$  см, кривизна волокна:  $R$  28,0; 3,6; 2,0 мм. Критический радиус и меньшие значения не могут быть достигнуты в силу недостаточной механической прочности световода. Потери энергии определялись в дБ/м. Результаты обработки полученных в эксперименте данных представлены на рис. 7.33.

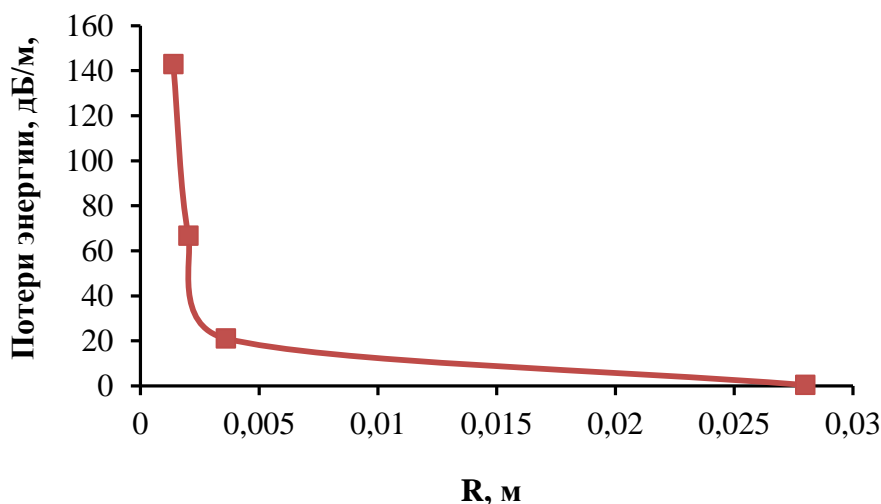


Рис. 7.33. Потери энергии при различных радиусах кривизны  $R$

По рис. 7.33 видно, что максимальные потери энергии достигаются при критическом радиусе изгиба и близким к нему значениям, что говорит об абсолютном нарушении закона полного внутреннего отражения. Таким образом, передача ИК-излучения через световод с радиусом изгиба  $R \leq 1,38$  мм осуществляться не будет. При увеличении радиуса наблюдается экспоненциальное уменьшение потери энергии. Так, при радиусе кривизны 28 мм потери энергии становятся пренебрежительно малыми. При численной оценке полученных значений можно утверждать, что радиусы изгиба световода, в десятки раз превышающие критическое значение ( $R = 28$  мм  $\approx 20R_{кр}$ ),

не несут существенных потерь энергии, таким образом изогнутые волокна могут применяться для передачи теплового излучения.

Таким образом, применение модифицированных галогенидсеребряных световодов дает возможность проведения измерений температуры нагретых объектов с использованием метода инфракрасной термографии и низкотемпературной пирометрии. Для выполнения таких измерений необходима предварительная тарировка световодов с целью определения их поглотительной способности в ИК-диапазоне.

В экспериментах выявлено, что диаметр световода не влияет на пропускание ИК-излучения, а доля переданной тепловой энергии увеличивается при наличии изоляционных материалов. Также был определен критический радиус изгиба и оценены потери теплового излучения при радиусах, превышающих критический.

#### ***7.1.9. Передача теплового изображения через оптическую волоконную сборку***

Возможность передачи температуры различных объектов посредством кристаллических инфракрасных световодов на основе твердых растворов галогенидов серебра и таллия (I) является новым направлением, открывающим широкие перспективы применения. Наибольший интерес как с фундаментальной, так и с практической точки зрения представляет изучение в реальном времени распределения температурного поля нагретого тела с использованием волоконно-оптического кабеля. Сегодня подобная технология реализована в эндоскопах с волоконной оптикой, используемых в медицине для визуального осмотра внутренних полостей организма человека, биопсии, хирургического и терапевтического воздействия на биологические ткани лазерным излучением [27]. Получение теплового (инфракрасного) изображения в отличие от эндоскопического изображения в видимой части спектра имеет ряд заметных преимуществ. Так, получение данных о температурном распределении в медицине позволит локализовать и оценить степень любого воспалительного процесса, в том числе и при онкологических заболеваниях, что в дальнейшем будет способствовать правильному выбору методики лечения и упростит процедуру воздействия на очаг заражения. С использованием инфракрасного волоконно-оптического кабеля при дефектоскопии энергетического оборудования и его составных частей за счет разницы температур можно вы-

явить наличие различного рода повреждений и своевременно произвести техническое обслуживание, тем самым сократив риск выхода из строя всего агрегата. Кроме того, данное оборудование может быть использовано для контроля качества сварных швов, измерения и анализа тепловых параметров внутри трубопроводов и множества других применений.

С целью проверки возможности передачи теплового изображения с помощью кристаллических инфракрасных световодов на основе галогенидов серебра была изготовлена сборка из семи волокон состава  $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$  (рис. 7.34).

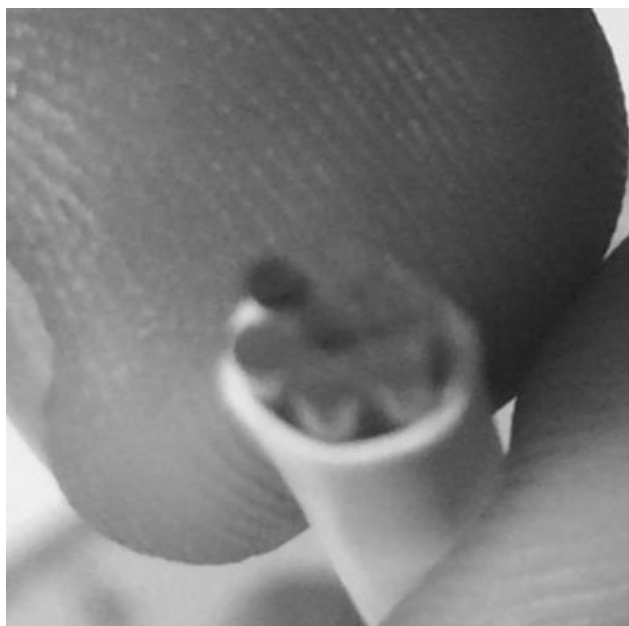


Рис. 7.34. Фотография принимающего торца волоконно-оптической сборки ИК-световодов

В качестве объекта наблюдения выступала медная проволока диаметром в три раза меньшим, чем диаметр единичного волокна сборки (300 мкм), которая наматывалась на поверхность элемента Пельтье. Нагрев проволоки от теплового источника излучения осуществлялся за счет механизма теплопроводности, который из-за контактного термического сопротивления не позволял объекту достигнуть температуры источника за время наблюдения. Тепловизионные изображения проволоки (рис. 7.35) четко показывают разницу температур объекта наблюдения и источника, что говорит о хорошей степени визуализации. Для наглядности изображения на рисунке повернуты на угол 30 °.



Волоконно-оптическая сборка располагалась перпендикулярно относительно поверхности источника теплового излучения и перемещалась вправо-влево при вертикальном расположении проволоки. При это в режиме реального времени наблюдалось изменение регистрируемой тепловизором температуры отдельных волокон, что означало появление под поверхностью принимающего торца объекта наблюдения.

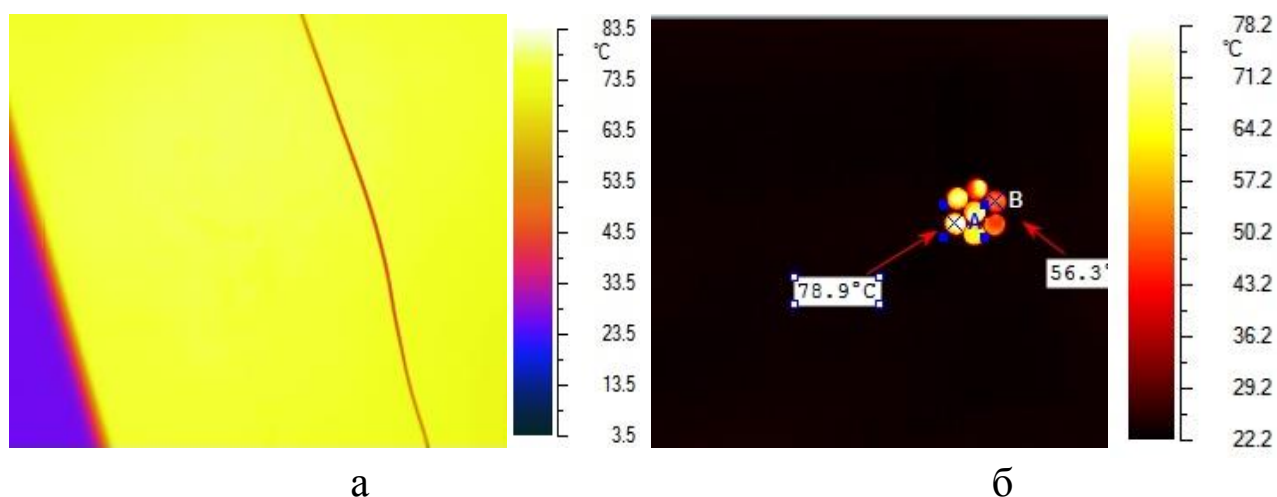


Рис. 7.35. Тепловизионное изображение а – проволоки, расположенной на источнике теплового излучения; б – принимающего торца волоконно-оптической сборки

Как и предполагалось, температура проволоки значительно отличалась от температуры элемента Пельтье, что позволяло без труда фиксировать её температурное поле через волоконно-оптическую сборку. Во всех экспериментах температура источника теплового излучения составляла 350 К. Тепловизионные изображения принимающего торца волоконно-оптической сборки приведены на рис. 7.35, б.

Таким образом, исходя из полученных данных, можно заключить, что существует принципиальная возможность передачи тепловизионного изображения через волоконно-оптический кабель, изготовленный из световодов на основе твердых растворов галогенидов серебра. Однако результаты экспериментов показывают, что столь малая сборка не способна передавать четкую тепловизионную картину объекта, а лишь может регистрировать температуру, как и единичный световод. Решением данной задачи является повышение разрешающей способности волоконно-оптического кабеля за счет увеличения числа единичных световодов в структуре, а также уменьшения их диаметра.

### 7.1.10. Контроль термического состояния лопаток газотурбинных установок

В энергетике существует множество аппаратов, тепловой контроль работы которых необходим и важен. Примером может служить газотурбинное оборудование, при работе которого нужно отслеживать не только внутренние параметры, такие как температура, давление, скорость и т. д., но и состояние деталей и механизмов, так как выход из строя даже одной рабочей лопатки может привести к поломке всей турбины. В связи с этим необходимо разрабатывать новые аппаратные методы исследования сложных систем, позволяющие изучать их строение, а также процессы, происходящие внутри них. Наиболее перспективным способом решения подобной задачи является использование оптического метода исследования. Для решения этой задачи была создана пилотная физическая модель волоконно-оптического тепловизора (рис. 7.36).

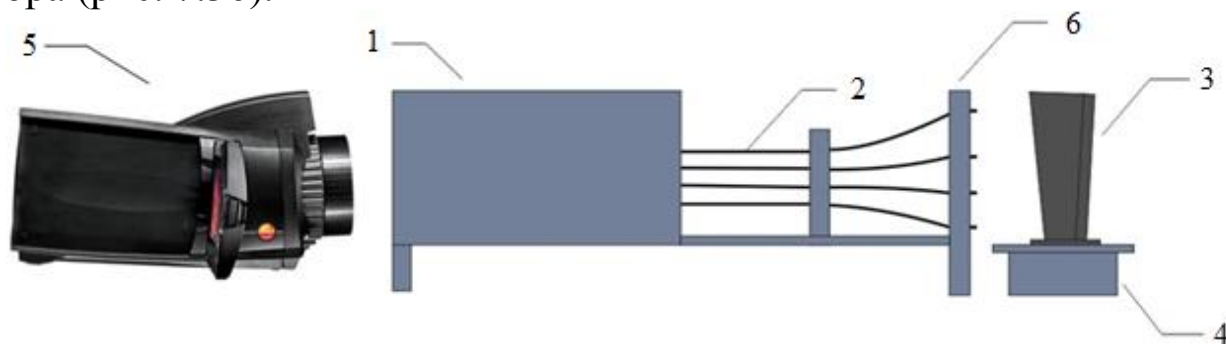


Рис. 7.36. Схема пилотной физической модели волоконно-оптического тепловизора: 1 – закрытый корпус, 2 – инфракрасные световоды состава  $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$  диаметром 1.12 мм и длиной 25 см, 3 – лопатка ГТУ, 4 – ванночка с трансформаторным маслом, 5 – тепловизор NEC 7102WV, 6 – держатель

Рабочая лопатка газо-турбинной установки (ГТУ) помещалась в ванночку с разогретым трансформаторным маслом, которое нагревало «хвостовик» лопатки. Распределение температуры по высоте перьевой части рабочей лопатки было неравномерным за счет постоянного охлаждения по механизму свободной конвекции и излучения. Тепловое излучение от нагретой лопатки передавалось по световодам и регистрировалось тепловизором. Термограммы торцов световодов, находящихся в закрытом корпусе, и рабочей лопатки ГТУ представлены на рис. 7.37, а и 7.37, б соответственно. На рис. 7.38 приведен график температурного распределения по высоте лопатки.

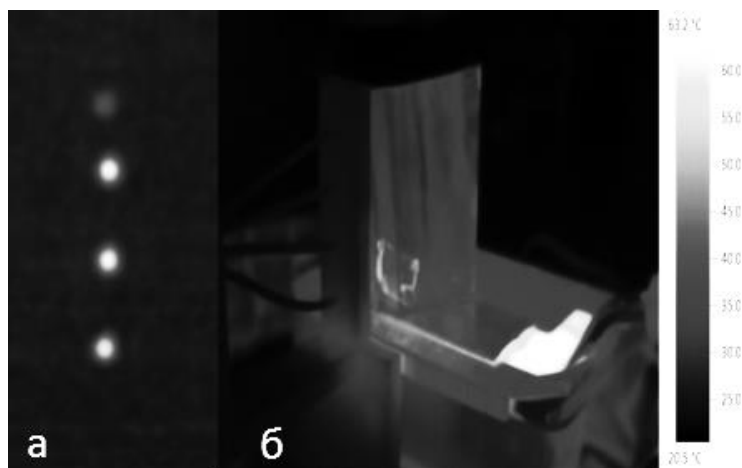


Рисунок 7.37 – Термограммы торцов световодов (а) и рабочей лопатки ГТУ (б)

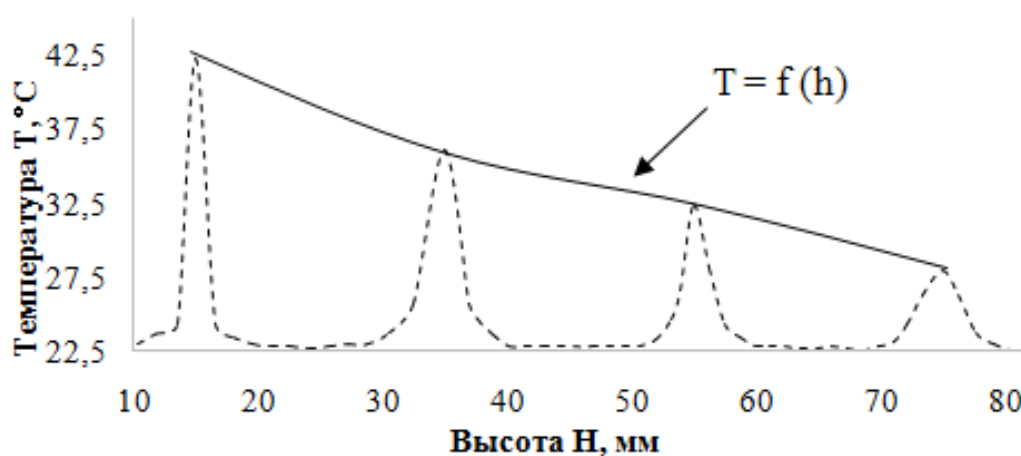


Рисунок 7.38 – График распределения температуры по высоте рабочей лопатки ГТУ

Как и предполагалось, лопатка была разогрета неравномерно, что четко показано на графике температурного распределения. Поскольку принципиальная возможность экспериментально была подтверждена, предлагается в дальнейшем изготовить волоконно-оптический тепловизор, передающий тепловизионную картину от исследуемого объекта к матрице тепловизионной камеры.

#### ***7.1.11. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия для биологических исследований***

Конфокальная лазерная сканирующая отражательная микроскопия является методом оптического трехмерного (3D) поверхностного профилирования с высокой разрешающей способностью.

В настоящее время интенсивно развиваются методы, использующие новейшие технические достижения в приборостроении, вклю-

чая получение информации о выходе излучения из каждой точки анализируемого объекта, изменение интенсивности во времени и спектральное разложение излучения для каждой точки в любой момент времени (так называемые 3D-, 4D- и 5D-режимы) [28]. Аналитические возможности новых методов могут расширяться путём использования нескольких лазерных источников одновременно, вариации их совместного использования и применения новых волоконных каналов доставки излучения непосредственно в живую клетку – световодов на основе твёрдых растворов галогенидов серебра систем  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ ,  $\text{AgCl} - \text{AgBr} - \text{AgI}$ ,  $\text{AgBr} - \text{AgI}$ , прозрачных в спектральном диапазоне от 2 до 22 мкм.

Высокая числовая апертура линзовых объективов (до 1,0) обеспечивает получение изображений с высоким разрешением вдоль оптического и поперечного направлений, превышавшим в несколько раз дифракционный предел, которым ограничены оптические классические микроскопы.

Кроме того, конфокальные микроскопы обладают значительным контрастом по сравнению с классическими оптическими микроскопами за счет использования специальной диафрагмы (пинхол), отсекающей поток фонового рассеянного света – это помогает улучшить качество изображения (рис. 7.39).

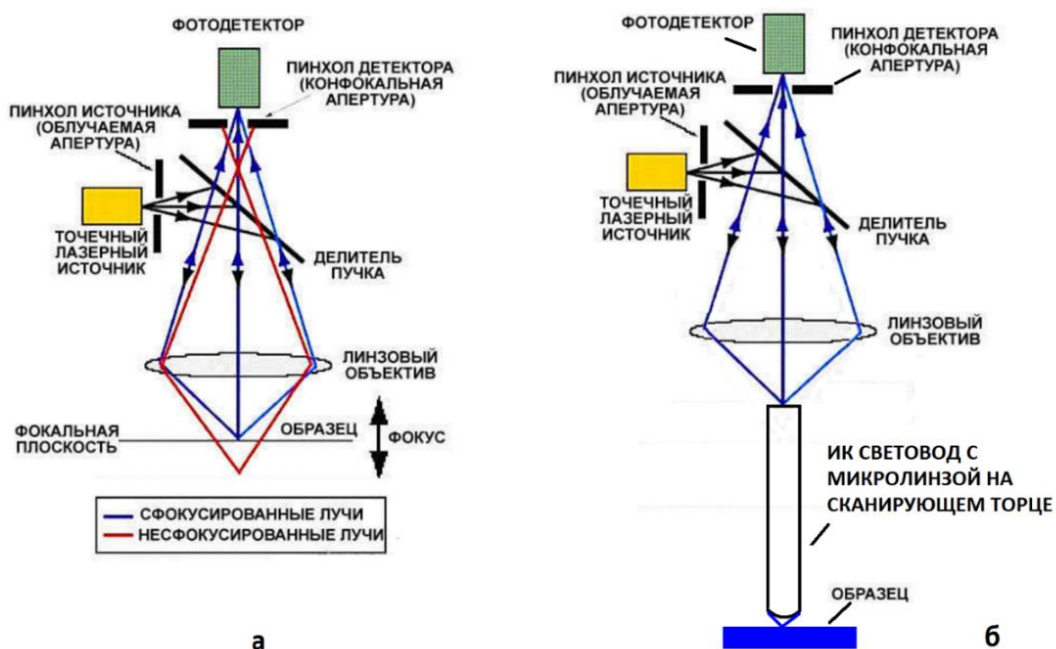


Рис. 7.39. Принципиальные схемы конфокального лазерного микроскопа: существующие отражательные микроскопы (а); микроскоп с использованием ИК-световодов с микролинзой на сканирующем торце (б)

В конфокальном микроскопе в каждый момент времени регистрируется изображение одной точки объекта, а полноценное изображение строится путем сканирования (движение образца или перестройка оптической системы). Для того чтобы регистрировать свет только от одной точки, после объектива располагается пинхол таким образом, что свет, испускаемый анализируемой точкой, проходит через него и будет зарегистрирован, а свет от остальных точек отрезается данным пинхолом [29].

Повышение контраста изображения также достигается за счет того, что осветитель создает не равномерную освещенность поля зрения, а фокусирует свет в анализируемую точку. Это может достигаться за счет использования светоделительной пластинки, так чтобы и падающий и отраженный свет фокусировались одним объективом. Такая схема к тому же облегчает юстировку.

Получение изображения в режиме реального времени достигается за счет модуля быстрого сканирования и алгоритма обработки сигналов. Для получения 3D-профиля поверхности образца требуется менее 1 с. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия является техникой оптического неразрушающего контроля для профилирования поверхностей микроструктур с высоким разрешением. Это является идеальным решением для измерения и проверки полупроводниковых пластин.

В биологических и медицинских исследованиях конфокальная лазерная сканирующая микроскопия имеет очень большой потенциал, особенно в ИК-области спектра за счёт более глубокого проникновения ИК излучения в живые ткани и возможности проводить одновременно и спектральный послойный анализ.

В настоящее время используются конфокальные лазерные микроскопы с перестраиваемыми лазерами в диапазоне длин волн 2 – 4 мкм [30]. Кроме того, разрабатываются и лазеры до 14 мкм для конфокальных лазерных микроскопов.

Особенно интересно, в связи с этим развитием, наличие волоконного многожильного канала доставки ИК излучения к живым объектам (рис. 7.40), так как происходящие процессы в живых клетках быстротекущие, а время точечного сканирования зачастую занимает достаточно продолжительный интервал в сравнении с исследуемыми процессами. Волоконная сборка способна заменить сложный и дорогостоящий микролинзовый диск Нипкова, применяемый для увеличе-

ния скорости сканирования (рис. 7.40, а). Другим преимуществом использования как единичного оптического световода, так и волоконной сборки по сравнению с высокоапертурным объективом является малый внешний диаметр и гибкость, что позволит значительно лучше проникнуть в исследуемый объект (рис. 7.40, б).

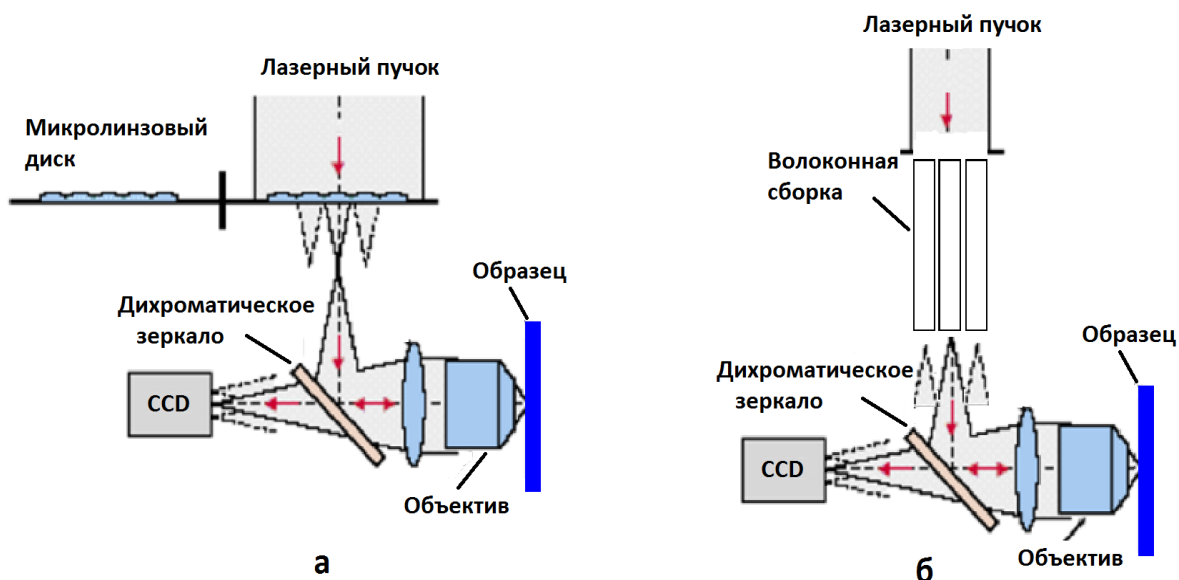


Рис. 7.40. Схема работы лазерного конфокального микроскопа с ускоренным сканированием объекта: оптическая схема на основе дисков Нипкова (а); использование волоконной сборки в лазерной конфокальной микроскопии (б)

## 7.2. Использование ФКС волокон в оптическом приборостроении

### 7.2.1. ФКС для лазерной медицины на длине волны 5,75 мкм

Медицинские лазеры применяются для лечения широкого спектра заболеваний, благодаря их способности фокусировать излучение в пучок малого диаметра при узком диапазоне длин волн, поглощаемых тем или иным типом ткани. Данное свойство дает лазерам огромный потенциал для создания высокоточных хирургических методов лечения, направленных на разрез или удаление слоев с сохранением окружающих тканей.

На сегодняшний день широко используются хирургические лазеры ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра для лечения различных заболеваний в офтальмологии, дерматологии, отоларингологии и пр. Применение данных лазеров ограничивается крупными объектами и тканями, так как при более

тонких операциях (например нейро- и офтальмохирургии) лазерное излучение приводит к повреждению биотканей [31, 32].

Для безопасного операционного воздействия на мягкие ткани и малые объекты наиболее привлекательным является средний ИК-диапазон. Высокое поглощение излучения водой и белками в среднем ИК ведут к точному воздействию на ткани, а возбуждение в полосы колебательных переходов позволяет изменять структуру биоткани, влияя тем самым на селективность удаления [33].

Рядом с ИК-полосой поглощения белков ( $\lambda = 6,1$  мкм) при  $\lambda = 5,75$  мкм находится полоса поглощения холестерина эфиров в атеросклеротических бляшках, отсутствующая у стенок сосудов. Это позволяет рассматривать лазерное расширение сосудов (ангиопластика) на длине волны  $\lambda = 5,75$  мкм как перспективный метод решения проблемы удаления атеросклеротических бляшек из стенок артерий [35].

Научной группой «ГОИ им. С. И. Вавилова», г. Санкт-Петербург, в составе Серебрякова В.А., Бойко Е.В., Петрищева Н.Н, Калинцевой Н.А. и пр. был разработан твердотельный волоконный лазер/Но: YLF/ZGP с плавной перестройкой длины волны излучения в диапазоне  $3 \div 6$  мкм с эффективностью до 40 % при энергии импульса около 100 мДж на частоте следования 100 Гц. Уникальность данного лазера состоит в узком диапазоне длин волн, точной перестройке на нужную длину до сотых микрон, высокой эффективности и частоте следования импульсов [33].

Применение такого твердотельного лазера ограничивается отсутствием волоконных каналов доставки, необходимых для проникновения в сосуд с целью прямого воздействия излучением на атеросклеротические бляшки.

Существует ряд инфракрасных материалов для среднего ИК-диапазона, которые подходят для изготовления медицинских волоконных зондов, одними из которых являются твердые растворы модифицированных галогенидов серебра системы AgCl-AgBr. Эти материалы пропускают в широком диапазоне длин волн от 0,5 до 45 мкм (кристаллы), от 2 до 25 мкм (световоды), имеют малые оптические потери до 0,1 дБ/м, а также безопасны для здоровья человека [1].

На основе твердых растворов галогенидов серебра могут быть изготовлены фотонно-кристаллические световоды (ФКС), работающие в одномодовом режиме с высокими селективными свойствами, малой



числовой апертурой и гауссовским распределением поля моды. Приведенные свойства особенно важны для передачи узкого диапазона длин волн ( $5,75 \pm 0,1$  мкм), что обеспечивает безопасность стенок сосудов, точечного воздействия на ткани, что возможно при малой числовой апертуре ФКС, а также равномерности распределения поля в поперечном сечении сосуда.

Для исследования ФКС на его свойства и определения основных параметров волокна перед этапом его производства было выполнено компьютерное моделирование в программе SMTP, интегрированной в Matlab. Компьютерная симуляция позволила выбрать оптимальные геометрические параметры волокна, определить режим его работы при длине волны  $\lambda = 5,75$  мкм, оценить модовую дисперсию в поперечном сечении световода.

В симуляции был рассмотрен твердый раствор  $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ , который содержал от 75 до 87 мол. %  $\text{AgBr}$  в  $\text{AgCl}$ . Для ФКС была выбрана гексагональная структура вставок с центральным дефектом (АС), размеры вставки  $d_i$  варьировались от 11 до 25 мкм, с отношением  $d_i/\Lambda = 0,4$  (где  $\Lambda$  - межвставочное расстояние), диаметр сердцевины принимался постоянным  $D = 60$  мкм.

По результатам моделирования был получен фотонно-кристаллический световод состава:  $\text{AgCl}_{0,18}\text{Br}_{0,82}$  – гексагональное кольцо вставок,  $\text{AgCl}_{0,16}\text{Br}_{0,84}$  – матрица,  $\text{AgCl}_{0,13}\text{Br}_{0,87}$  – центральное включение, представленный на рис. 7.41. Диаметры вставок составили  $d_i = d_c = 10$  мкм с внешним диаметром 60 мкм, диаметр вставки 10 мкм.

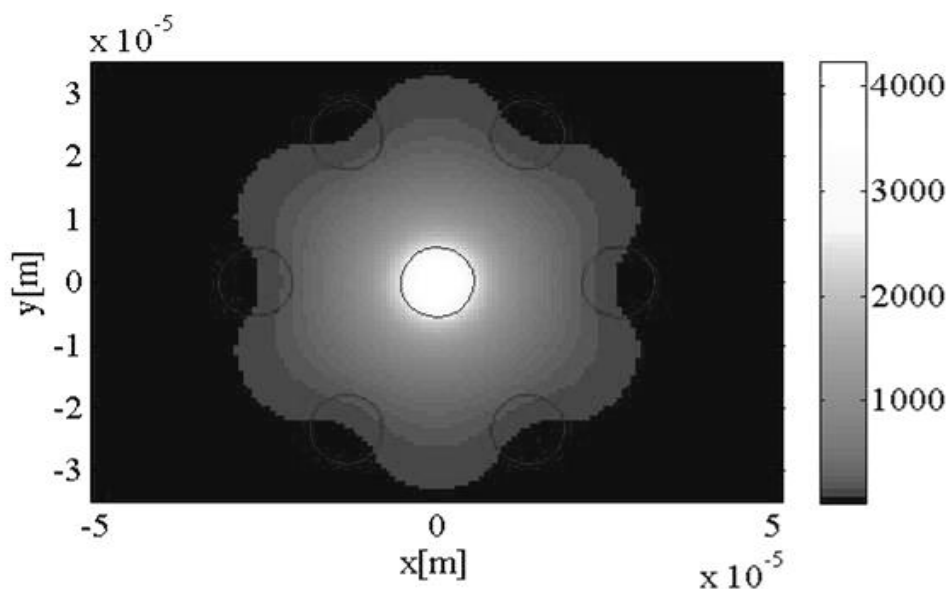




Рис. 7.41. Полученная модель распределения излучения в фотонно-кристаллическом световоде с гексагональной структурой вставок на длине волны 5,75 мкм

Полученный фотонно-кристаллический световод работает в одномодовом режиме с гауссовским распределением интенсивности излучения: эффективный диаметр поля моды равен 45 мкм, что обеспечивает эффективность практического применения данного ФКС (рис. 7.42). Смоделированное волокно обладает высокими селективными свойствам, так как пропускание излучения происходит в диапазоне длин волн  $5,75 \pm 0,1$  мкм, что делает безопасным применение световода для удаления атеросклеротических бляшек. За счет своих селективных свойств спроектированный ФКС может использоваться в качестве канала передачи излучения широкополосного устройства, включающего в свой диапазон 5,75 мкм, что упростит конструкцию лазерной системы и снизит ее стоимость.

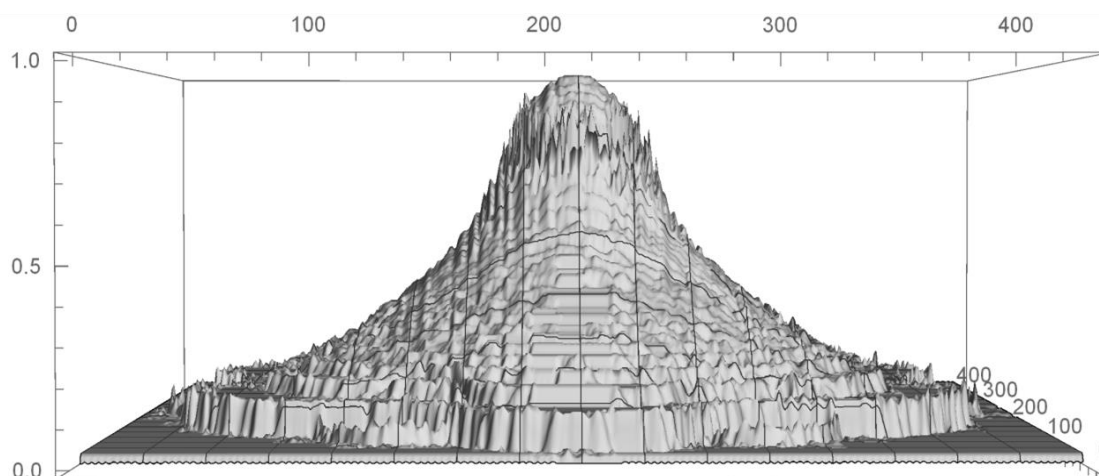


Рис. 7.42. Трехмерная модель распределения излучения в поперечном сечении ФКС

Для данного фотонно-кристаллического световода были рассчитаны числовая апертура NA и V-параметр:  $NA=9,3^0$ ,  $V=1,77$ . Обе величины соответствуют одномодовым световодам ( $V < 2,405$   $NA < 10^0$ ), что было подтверждено моделированием. Таким образом, совокупность симуляции и расчета показали возможность создания ФКС с гексагональной структурой вставок для медицинских лазеров с длиной волны 5,75 мкм.

После производства фотонно-кристаллического световода рассмотренной структуры будет проведена верификация данных компьютерного моделирования, а именно проведены эксперименты по передаче излучения перестраиваемым и широкополосным лазерами.

### **7.2.2. ФКС для космических исследований на длине волны 10,0 мкм**

Инфракрасное излучение среднего и дальнего диапазона спектра перспективно для использования в различных областях науки и техники: от инфракрасных лазеров до космических исследований. Переход от ближнего ИК-излучения к длинноволновой области связан с поиском новых прозрачных в этом диапазоне материалов. Наиболее перспективными из них являются твердые растворы на основе систем AgBr-КРС-5 и AgBr-ТII. Основными преимуществами данных материалов являются фотостойкость, устойчивость к радиации, механическая прочность, малые оптические потери [1]. Таким образом, световоды, изготовленные на основе представленных кристаллов, могут использоваться для космических исследований и радиационного контроля в атомной энергетике.

Существуют инфракрасные телескопы, наподобие широко известного телескопа «Спитцер», которые исследуют космическое пространство на предмет наличия землеподобных планет, холодных (остывших) звезд, пылевых облаков и других крупных объектов космоса, излучение которых соответствует среднему и дальнему областям ИК-спектра [34]. При оснащении данных космических устройств инфракрасными волокнами, в том числе на основе модифицированных галогенидов серебра, становится возможной идентификация конкретного космического объекта, наиболее приоритетными из которых являются землеподобные планеты, излучающие на длине волны  $\lambda=10$  мкм [1].

Для космических исследований могут быть применены инфракрасные волокна с фотонными запрещенными зонами на основе твердых растворов AgBr-ТII, поскольку они обладают высокими селективными свойствами, радиационной стойкостью, достаточной для космического пространства, высокой механической прочностью, устойчивостью к низким, близким к абсолютному нулю, температурам.

Чтобы уменьшить материальные и временные затраты, было использовано компьютерное моделирование фотонно-кристаллических световодов в программе SMTP. Компьютерная симуляция позволила

до этапа производства ФКС оценить геометрические размеры волокна, его модовый состав и дисперсию, числовую апертуру, диаметр поля моды в поперечном сечении световода.

Моделирование проводилось для длины волны 10 мкм и октагональной структуры кольцевых включений (фотонных запрещенных зон) при разных диаметрах волокна и его вставок:  $D = 80 \dots 200$  мкм  $d_i = d_c = 16 \dots 22$  мкм соответственно. Также во время моделирования менялись составы материалов матрицы и вставок от 1 мас. % до 20 мас. % ТII в AgBr. Всего при моделировании было рассмотрено более 100 структур ФКС.

На основании результатов моделирования были определены режим передачи, структура моды и эффективный показатель преломления оптического волокна в соответствии с выбранной оптимальной структурой ФКС. Наиболее эффективные модели состояли из кольца вставок, матрицы и центрального дефекта: 1 мас. % ТII в AgBr, 1,8 мас. % ТII в AgBr, 2,2 мас. % ТII в AgBr и 16 мас. % ТII в AgBr, 18 мас.% ТII в AgBr, 20 мас.% ТII в AgBr, с диаметром кольца 200 мкм, вставок – 16 мкм, полным – 250 мкм.

Поскольку с ростом массовой доли йодида таллия в бромиде серебра увеличивается радиационная стойкость волокна, в условиях космической радиации наиболее целесообразным является использование волокон второго состава. Кроме того, полученный фотонно-кристаллический световод обладает высокими селективными свойствами и полем моды, увеличенным до 180 мкм, с диаметром кольца вставок 200 мкм. Полученная модель фотонно-кристаллического световода показана на рис. 7.43.

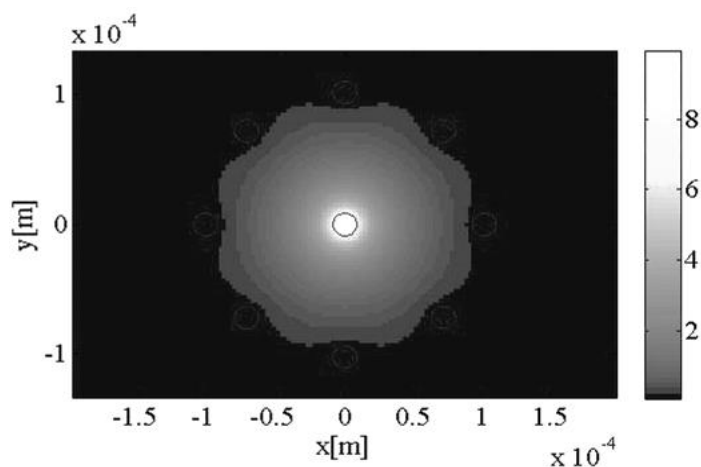


Рис. 7.43. 2D-модель поля моды в поперечном сечении ФКС при длине волны  $\lambda = 10$  мкм

Большой диаметр поля моды особенно важен для приемников излучения, а селективные свойства - для поиска землеподобных планет, поскольку световод выбранной структуры будет выполнять функции частотного фильтра без дополнительных оптических и электронных устройств, выделяя из всего спектра принимаемых длин волн  $\lambda = 10$  мкм.

Для световода выбранной структуры была построена трехмерная модель, показанная на рис. 7.44, которая отражает гауссовское распределение интенсивности излучения в поперечном сечении ФКС.

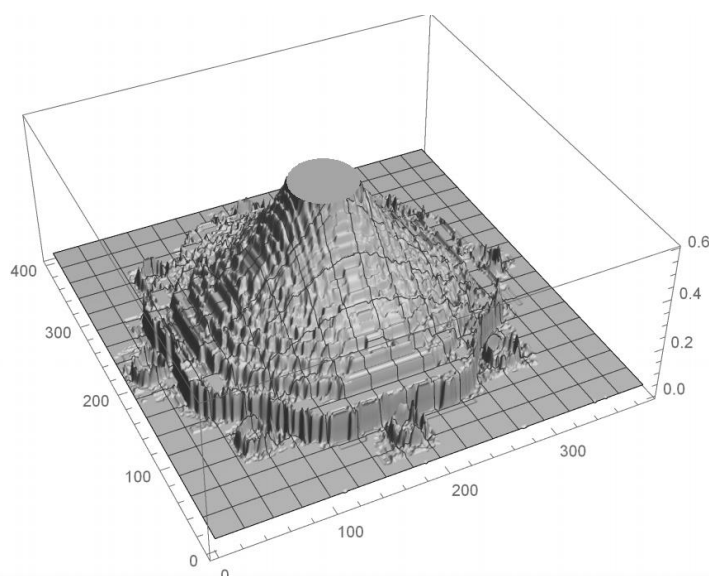


Рис. 7.44. Трехмерная модель распределения излучения в поперечном сечении ФКС

Для смоделированного фотонно-кристаллического световода были рассчитаны числовая апертура  $NA$ ,  $V$ -параметр, эффективная площадь моды  $A_{\text{eff}}$ :  $NA=8,9^0$ ,  $V=2,11$ ,  $A_{\text{eff}}=0,025$  мм<sup>2</sup>. Значения числовой апертуры и нормализованной частоты соответствуют одномодовым световодам ( $V < 2,405$   $NA < 10^0$ ), что было подтверждено моделированием. Таким образом, совокупность моделирования и расчета показала возможность создания ФКС с октагональной структурой вставок для космических исследований на длине волны 10,0 мкм.

### **7.2.3. ФКС для атомной энергетики на длине волны 10,6 мкм**

Для регистрации ионизирующего излучения, одним из которых является  $\gamma$ -излучение, наряду с традиционными счетчиками используются сцинтилляционные детекторы, чувствительным элементом в которых являются неорганические кристаллы. Широкое распростране-

ние сцинтилляционных методов обусловлено высокой чувствительностью к ионизирующему излучению, высокой температурой плавления и временной разрешающей способностью, а также широким спектром возможных форм и размеров счетчиков [16].

Перспективным направлением в развитии сцинтилляционных методов является использование оптических волокон, в том числе фотонно-кристаллических, на основе твердых растворов галогенидов серебра системы AgBr-КРС-6. Преимуществом волокон на основе данной системы является устойчивость к ионизирующему излучению до 500 кГр, фотостойкость, механическая прочность, широкий диапазон прозрачности [1].

Для атомной энергетики необходимы оптические сцинтилляторы на длине волны 10,6 мкм, таким образом, волоконный счетчик должен быть выполнен в виде ФКС, спроектированного для  $\lambda = 10,6$  мкм. Для оценки геометрических параметров и оптических свойств на этапе разработки световода, было применено компьютерное моделирование в программе SMTP. Входными параметрами симуляции были основные геометрические и оптические параметры предполагаемого волокна: гексагональная структура кольцевых включений при диаметрах волокна и его вставок:  $D = 160$  мкм и  $d_i = d_c = 16 \dots 20$  мкм соответственно. Также во время моделирования менялись составы материалов матрицы и вставок от 78 до 97 мол.% КРС-5 в AgBr. Всего при моделировании было рассмотрено 15 структур ФКС.

В результате моделирования были определены режим передачи ФКС, структура моды и эффективный показатель преломления оптического волокна в соответствии с выбранной оптимальной структурой световода. Наиболее эффективная модель ФКС представляет собой световод с диаметром сердцевины 160 мкм, вставками размером  $d_i = d_c = 20$  мкм, составом кольца вставок, матрицы и центрального включения: 90 мол.% КРС-5 в AgBr, 91 мол.% КРС-5 в AgBr, 92 мол.% КРС-5 в AgBr.

С ростом массовой доли КРС-5 в бромиде серебра увеличивается радиационная стойкость волокна, однако снижаются прочностные характеристики ФКС (световод становится хрупким). В связи с этим для атомной энергетики выбирался состав с достаточным количеством AgBr для сохранения механической гибкости при высоком содержании КРС-5 для устойчивости к ионизирующему излучению. Дополни-

тельно полученный фотонно-кристаллический световод обладает высокими селективными свойствами, полем моды  $D \approx 150$  мкм с диаметром кольца вставок 160 мкм, гауссовским распределением излучения в поперечном сечении волокна, как показано на рис. 7.45.

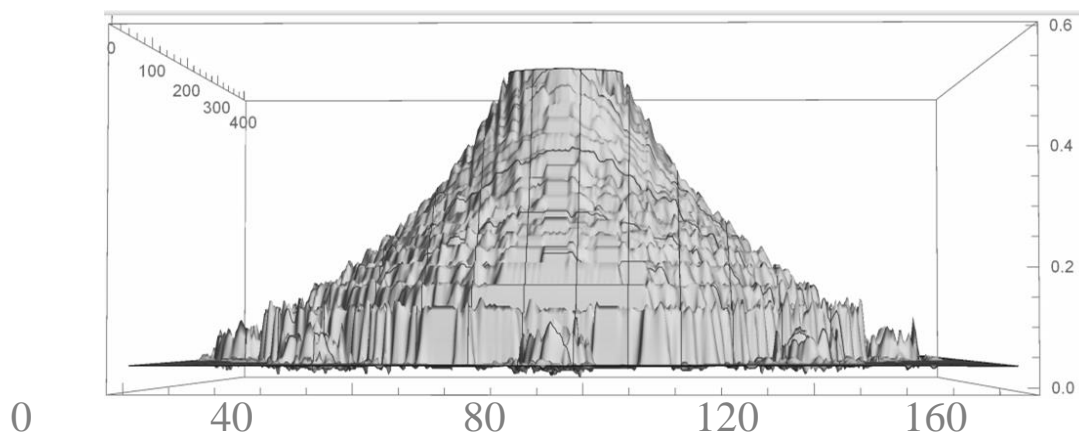


Рисунок 7.45 – Трехмерное изображение распределения излучения в поперечном сечении световода

Для смоделированного фотонно-кристаллического световода были рассчитаны числовая апертура  $NA$ ,  $V$ -параметр, эффективная площадь моды  $A_{\text{eff}}$ :  $NA=8,6^0$ ,  $V=2,04$ ,  $A_{\text{eff}}=0,017$  мм<sup>2</sup>. Значения числовой апертуры и нормализованной частоты соответствуют одномодовым световодам ( $V < 2,405$   $NA < 10^0$ ), что было подтверждено моделированием. Таким образом, для атомной энергетики возможно создание ФКС с гексагональной структурой вставок на длине волны 10,6 мкм.

## Выводы по главе 7

Глава посвящена ряду фундаментальных и актуальных прикладных задач оптики, ИК- волоконной оптики и фотоники. Это относительно новые научно-технические направления, однако они своими корнями связаны с вопросами классической оптики.

С появлением лазера стала возможной передача электромагнитного излучения через оптическую среду в диапазоне от 0,2 до 2,0 мкм по диэлектрическим кварцевым световодам. Новый класс галогенидсеребряных кристаллов, в том числе модифицированных галогенидами таллия (I) и волоконных световодов на их основе перекрывают спектральный диапазон от 2 до 25 мкм и далее.

Применение одно- и двухслойных, а также фотонно-кристаллических волокон возможно для широкого спектра прикладных устройств.

1. На базе галогенидсеребряной оптики (линзы, окна) и волоконных световодов для среднего ИК-диапазона (2,0 – 50,0 мкм) создана новая линейка волоконно-оптических зондов: с рабочим элементом «петля» и «двойная петля» (для неагрессивных жидких сред); с рабочим элементом «призма» и «конус» (для агрессивных жидких и твёрдых сред).

2. Разработан экспресс-метод и методика определения качественного и количественного состава веществ в режиме реального времени с использованием линейки ИК-волоконных зондов, подключенных к ИК-Фурье-спектрометру. Показана применимость ИК-зондов: в криминалистике для определения последовательности нанесения чернил; в химической промышленности для анализа водных растворов метанола и анализа химического состава гальванических ванн золочения.

3. На уровне изобретения создан двухслойный волоконный сцинтиллятор состава  $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}\text{I}_y\text{Tl}_{1-y}$  (TII).

5. Установлено, что галогенидсеребряные световоды эффективно химически стерилизуются, прозрачны в диапазоне от 2 до 20 мкм, имеют оптические потери 0,1 – 0,4 дБ/м на длине волны 10,6 мкм, нетоксичны и негигроскопичны, поэтому могут вывести целый класс медицинских лазеров, работающих в диапазоне от 3,0 до 10,6 мкм ( $\text{CO}_2$  лазеров), на совершенно новый уровень путём замены зеркально-шарнирного рукава на гибкий волоконный канал доставки лазерного излучения.

6. Представлена модель волоконного тепловизора для контроля термического состояния лопаток газотурбинной установки. Выявлена возможность передачи ИК-изображения через оптическую сборку на основе ИК-волокон.

7. Установлено эффективное применение галогенидсеребряных световодов в виде волоконной сборки в лазерной конфокальной сканирующей микроскопии для биологических исследований в спектральном диапазоне от 3 до 14 мкм.

### *Задачи*

1. Для НПВО-элементов величина оптического пути определяется глубиной проникновения в исследуемую среду  $d_p$ :

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi n_1 \sqrt{\sin^2 \theta - n_{21}^2}},$$

где  $n_1$  – показатель преломления НПВО-элемента,  $\theta$  – угол падения излучения,  $n_{21}$  – отношения показателей преломления материалов НПВО-элемента и исследуемой среды. Определите глубину проникновения излучения в заданную в таблице среду.

2. Определение количества влаги методом ИК-спектроскопии определяется законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$I = I_0 e^{-\alpha x d},$$

где  $I$  – интенсивность проходящего излучения,  $I_0$  – интенсивность падающего излучения,  $\alpha$  – коэффициент экстинкции вещества,  $x$  – концентрация вещества,  $d$  – величина оптического пути. В случае определения влаги методом эванесцентной спектроскопии  $d$  является глубиной проникновения излучения в исследуемую среду. Определите интенсивность проходящего излучения  $I$ , используя данные из расчета задачи 1 и значения из таблицы.

Данные для решения задач

№ варианта	$\lambda$ , мкм	$\theta^\circ$	$n_2$ , см	$n_1$ , см	$\alpha \cdot 10^{-3}$	$x$
1	0,6	50	1,1	2,136	38,3	0,1
2	1,1	45	1,2	2,202	26,4	0,2
3	1,5	40	1,0	2,212	13,4	0,3
4	2,0	50	1,5	2,154	43,9	0,4
5	3,5	45	1,4	2,149	331,5	0,5
6	0,6	40	1,1	2,156	244,3	0,1
7	1,1	50	1,2	2,205	56,4	0,2
8	1,5	45	1,0	2,136	18,5	0,3
9	2,0	40	1,5	2,124	26,4	0,4
10	3,5	50	1,4	2,149	13,4	0,5

### Библиографический список

- 1 Жукова, Л. В. Инфракрасные кристаллы. Теория и практика : учебник / Л. В. Жукова, А. С. Корсаков, Д. Д. Салимгареев. — Екатеринбург : УМЦ УПИ. — 2015. — 215 с.
- 2 Термодинамическое исследование кристаллов системы AgBr – TII и получение ИК-световодов нанокристаллической структуры на их



- основе / А. С. Корсаков [и др.] // Цветные металлы. — 2013. — № 4. — С. 62-66.
- 3 Structure modeling and growing  $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$ ,  $\text{Ag}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Br}_{1-x}\text{I}_x$ , and  $\text{Ag}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Cl}_y\text{I}_z\text{Br}_{1-y-z}$  crystals for infrared fiber optics / A. Korsakov [et al.] // J. Cryst. Growth. — 2014. — Vol. 386. — P. 94-99.
  - 4 Волоконные световоды из галогенидов таллия для среднего ИК-диапазона / В. Г. Артющенко [и др.] // Квантовая электроника. — 1981. — Т. 8, № 2. — С. 398-400.
  - 5 Инфракрасные поликристаллические световоды на основе галогенидов серебра / В. Г. Артющенко [и др.] // Квантовая электроника. — 1986. — Т. 13, № 3. — С. 601-606.
  - 6 Fiber probe for the spectral range of 2-45  $\mu\text{m}$  for IR-Fourier spectrometer / A.S. Korsakov [et. al.] // Optics InfoBase Conference Papers. — 2013. — P. FTu3D.5
  - 7 Накомото, К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / К. Накомото. — Москва : Мир. — 1991. — 536 с.
  - 8 Гал, Т. Определение последовательности выполнения пересекающихся штрихов методом Фурье-ИК-НПВО-микроскопии / Т. Гал, А. Кароли, Ю. Сандор // Теория и практика судебной экспертизы. Научно-практический журнал. — 2006. — Т. 2, № 2. — С. 166-168.
  - 9 Шаскольская, М. П. Акустические кристаллы / М. П. Шаскольская. — Москва : Наука. — 1982. — 632 с.
  - 10 Mechanisms of optical losses in polycrystalline KRS-5 fibers / V. G. Artjushenko [et al.] // J. Lightwave Technology. — 1986. — Vol. 4, № 4. — P. 461-465.
  - 11 Raichlin, Y. Fiber-Optic Evanescent Wave Spectroscopy in the Middle Infrared / Y. Raichlin, A. Katzir // Applied Spectroscopy. — 2008. — Vol. 62, № 2. — P. 55A-72A.
  - 12 Бухмиров В.В. Теоретические основы теплотехники. Основы тепломассообмена/ В.В. Бухмиров – Иваново: ИГЭУ, 2011 – 68 с.
  - 13 Butvina, L. N. Optical absorption by free carriers in materials for IR fibers / L. N. Butvina, E. M. Dianov // Proc. SPIE. — 1984. — V. 484. — P. 21-29.
  - 14 Investigating the properties of infrared ФКСs based on  $\text{AgCl-AgBr}$ ,  $\text{AgBr-TlI}$ ,  $\text{AgCl-AgBr-AgI(TlI)}$  crystals theoretically and experimentally / A.S. Korsakov, L.V. Zhukova, D.S.Vrublevsky, E.A. Korsakova // Optics and Spectroscopy. — 2014. — Vol. 117, Issue 6. — P. 960-963.

- 15 Бурков В.Д. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники/ В.Д. Бурков, Г.А. Иванов. — Москва : МГУЛ. — 2008. — 332 с.
- 16 Haglund R. F. Applications of free electron lasers in biological sciences, medicine and material science / R.F. Haglund// Photon-based Nanoscience and Nanobiotechnology. — 2006. — P. 175-203.
- 17 Жукова Л.В. Серебряная медаль ВДНХ СССР, удостоверение № 17604, постановление от 04.12.86. Высокочистые кристаллы галогенидов серебра.
- 18 Кристаллический сцинтиллятор Лия-2 : пат. 2066464 Рос. Федерации, МПК G01T1/202 / Жукова Л. В., Жуков В. В., Шульгин Б. В., Китаев Г. А., Гаврилов Л. Ф., Викторов Л. В. ; заявитель и патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью Научно-технический центр «Оптические материалы» при Уральском государственном техническом университете. — заявл. 31.05.1994 ; опубл. 10.09.1996, Бюл. 7. — 4 с.
- 19 Кристаллический сцинтиллятор Лия-3 : пат. 2284044 Рос. Федерации, МПК G01T1/202 / Жукова Л. В., Шульгин Б. В., Жуков В. В., Горкунова С. И., Райков Д. В., Чазов А. И., Сергеев А. В. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Уральский государственный технический университет-УПИ. — заявл. 13.05.2005 ; опубл. 20.09.2006, Бюл. 26. — 3 с.
- 20 Сцинтилляционный световод : пат. 2154290 Рос. Федерации, МПК 7 G02B6/02, G02B6/16 / Жукова Л. В., Жуков В. В., Шульгин Б. В., Макурин Ю. Н. ; заявитель и патентообладатель Уральский государственный технический университет. — заявл. 11.05.1999 ; опубл. 10.08.2000, Бюл. 22. — 3 с.
- 21 Эндоскопическая торакальная хирургия / А. М. Шулутко [и др.] // Москва : Медицина. — 2006. — 392 с.
- 22 ГОСТ 42-21-2-85. Стерилизация и дезинфекция изделий медицинского назначения. Методы, средства и режимы. — Москва : Издательство стандартов, 1986. — 19 с.
- 23 МУ 287-113. Методические указания по дезинфекции, предстерилизационной очистке и стерилизации изделий медицинского назначения. — Москва : Издательство стандартов. — 1989. — 28 с.
- 24 Finnerty, B. In first year, partnership targets rapid advances in biomedical sciences, technology and education [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rit.edu/news/story.php?id=47201>
- 25 Исаченко, В. П. Теплопередача: учебник для вузов / В. П. Исаченко,

- В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — Москва : Энергия. — 1975. — 488 с.
- 26 Шмыгалев, А. С. Исследование и применение возможности передачи тепловой энергии кристаллическими световодами (2–40 мкм) / А. С. Шмыгалев, С. В. Фатьянов // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. — 2015. — Т. 6, № 126. — С. 109-110.
- 27 Хацевич, Т. Н. Эндоскопы: Учеб. пособие / Т. Н. Хацевич, И. О. Михайлов. — Новосибирск : СГГА, 2002. — 196 с.
- 28 Наночастицы, наносистемы и их применение. Коллоидные квантовые точки / под ред. В. А. Мошникова, О. А. Александровой. — Уфа : Аэтерна, 2015. — 236 с.
- 29 Промэнерголаб. Конфокальная микроскопия [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Режим доступа: <https://www.czl.ru/tgroups/confocal-laser-scanning-microscopy/>
- 30 Doubling the far-field resolution in midinfrared microscopy / Mahendar Kumbham [et al.] // Optics Express. — 2016. — Vol. 24, № 21. — P. 17.
- 31 Serebryakov V. A. Medical applications of mid-IR lasers. Problems and prospects science/ V. A. Serebryakov, E. V. Boiko, N. N. Petrishchev, A. V. Yan// Optical Technology. — 2010. — Vol. 77, № 1. — P. 6-17.
- 32 Xiao Y. Wavelength-dependent conformational changes in collagen after mid-infrared laser ablation of cornea science/ Y. Xiao, M. Guo, P. Zhang [et. al.] // Biophysical Journal. — 2008. — Vol. 94. — P. 1359-1366.
- 33 Awazu K. A. Infrared laser therapy using IR absorption of biomolecules science / K. A. Awazu, K. Ishii, H. Hazama // Physics: Conference Series . — 2011. — P. 1-9.
- 34 Official site of the Jet Propulsion Laboratory (California Institute of Technology– Caltech): NASA Spitzer Space Telescope [Электронный ресурс]. — USA, California, 2016. — Режим доступа: <http://www.spitzer.caltech.edu>

## ПАТЕНТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

### Патент 2154290 РФ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СВЕТОВОД G02B6/02, G02B6/16

Код(ы) МПК

Библиографи-  
ческая

ссылка

Пат. 2154290 РФ. Сцинтилляционный световод / Жукова Л. В., Жуков В. В., Шульгин Б. В., Макурин Ю. Н. Заявл. 11.05.1999; опубл. 10.08.2000. Бюл. № 8

#### Реферат

Световод используют для обнаружения и измерения ионизирующего излучения (рентгеновского, гамма, альфа и электронного). Состав сцинтилляционного световода – твердые растворы на основе галогенидов серебра, мас. %: AgCl 17,980–27,000; AgBr 82,000–72,499; AgI 0,010–0,500, которые активированы добавками либо таллия, либо хрома, либо европия, либо церия в количестве 0,01–0.001 мас. %. Световоды получают длиной до 50 м и более. Они негигроскопичны, высоко пластичны, нетоксичны, имеют высокую плотность – 6,4 г/см<sup>3</sup> и эффективный атомный номер  $Z_{\text{эфф}} = 42,7–42,8$ ; обладают малым временем высвечивания – 20 нс и имеют удобный для регистрации спектр свечения с максимумом при 400 нм. Рабочий температурный диапазон от – 60 до + 200 °С.

### Патент 2173867 РФ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ G02B6/16, C03B37/018

Код(ы) МПК

Библиографиче-  
ская

ссылка

Пат. 2173867 РФ. Способ получения волоконных световодов / Зелянский А. В., Копытов С. М., Жукова Л. В., Жуков В. В. Заявл. 10.05.2000.; опубл. 20.09.2001 Бюл. № 36

#### Реферат

На заготовки из галогенидов серебра либо галогенидов одновалентного таллия, либо галогенидов цезия осаждают плотный дисперсионный слой, соответствующий составу световода, из растворов, которые содержат в равных соотношениях галогенводородную кислоту, например HCl либо HBr и аммиак. Технический результат: при экструзии такой заготовки в контейнере создается реактивная галогенводородная атмосфера, которая способствует устранению процесса окисления галогенидов металлов.

**Патент 2174247 РФ**

## **СВЕТОВОД ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА**

Код(ы) МПК

**G02B6/16**

Библиографическая  
ссылка

Пат. 2174247 РФ. Световод для инфракрасной области спектра / Жукова Л. В., Зелянский А. В., Жуков В. В., Китаев Г. А. Заявл. 28.02.2000; опубл. 27.09.2001. Бюл. № 25

### **Реферат**

Использование в качестве прозрачного в среднем и дальнем ИК-диапазоне гибкого волоконно-оптического световода. Сердцевина световода выполнена из твердых растворов хлорид-бромид-иодида серебра, мас. %: AgCl 17,99–20,95; AgBr 82,00–79,00; AgI 0,01–0,05, а отражающая оболочка световода имеет показатель преломления меньше, чем в его сердцевине, на величину 0,01–0,05. Световод прозрачен в широкой области спектра – от 2 до 40 мкм. Это свойство позволяет передавать не только лазерное излучение, но и является волоконным сенсором. Полные оптические потери составляют 0,1 дБ/м, прочность на разрыв 200–250 МПа, радиус упругого изгиба 5–6 мм. Повышена фотостойкость световода вследствие оптимального состава и введения иодида серебра.

**Патент 2340920 РФ**

## **ОДНОМОДОВЫЙ ДВУХСЛОЙНЫЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ИНФРАКРАСНЫЙ СВЕТОВОД**

Код(ы) МПК

**G02B6/02**

Библиографическая  
ссылка

Пат. 2340920 РФ. Одномодовый двухслойный кристаллический инфракрасный световод / Жукова Л. В., Чазов А. И., Примеров Н. В., Корсаков А. С., Жуков В. В. Заявл. 23.08.2007; опубл. 10.12.2008.

### Реферат

Изобретение относится к волоконно-оптическим системам связи, а именно к одномодовым двухслойным кристаллическим инфракрасным световодам для диапазона спектра от 5 до 30 мкм. Световод включает сердцевину и оболочку. Сердцевина диаметром 15–45 мкм выполнена из твердых растворов хлорид-бромид серебра, легированных йодидом одновалентного таллия, при следующем соотношении ингредиентов, мас. %: хлорид серебра 19,5–15,0; бромид серебра 80,0–82,0; йодид одновалентного таллия 0,5–3,0. Оболочка диаметром 0,7–1,0 мм выполнена из твердых растворов хлорид-бромид серебра при следующем соотношении в мас. %: хлорид серебра 19,0–21,0; бромид серебра 81,0–79,0. Технический результат – получение одномодового двухслойного кристаллического световода для пропускания электромагнитного излучения в средней и дальней инфракрасной области спектра (5–30 мкм).

### Патент 2340921 РФ ОДНОМОДОВЫЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ИНФРАКРАСНЫЙ СВЕТОВОД

Код(ы) МПК

**G02B6/02**

Библиографическая  
ссылка

Пат. 2340921 РФ. Одномодовый кристаллический инфракрасный световод / Жукова Л. В., Жуков В. В., Примеров Н. В., Чазов А. И., Корсаков А. С. Заявл. 28.08.2007; опубл. 10.12.2008.

### Реферат

Изобретение относится к волоконно-оптическим системам связи и предназначено для передачи информации по одномодовым кристаллическим инфракрасным световодам в широком спектральном диапазоне. Одномодовый кристаллический инфракрасный световод включает сердцевину и оболочку. Световод выполнен на основе твердых

растворов хлорид-бромид серебра. Сердцевина имеет диаметр 20–110 мкм и содержит ингредиенты при следующем соотношении в мас. %: хлорид серебра 19,0–21,0; бромид серебра 81,0–79,0. Оболочка содержит те же ингредиенты при следующем соотношении в мас. %: хлорид серебра 25,0–35,0; бромид серебра 75,0–65,0. Технический результат – получение световодов, предназначенных для работы в широком спектральном диапазоне (3–30 мкм).

**Патент 2361239 РФ**

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ**

**G01T1/00**

Код(ы) МПК

Библиографическая  
ссылка

Пат. 2361239 РФ. Способ получения волоконных сцинтилляторов / Жукова Л. В., Черепанов А. Н., Примеров Н. В., Корсаков А. С., Шульгин Б. В., Чазов А. И., Жуков В. В. Заявл. 07.04.2008; опубл. 10.07.2009.

**Реферат**

Изобретение относится к сцинтилляционным материалам, конкретно к волоконным сцинтилляторам, предназначенным для измерения ионизирующих излучений. Способ получения волоконных сцинтилляторов, включающий разогрев материала сцинтиллятора с последующим формированием структуры волокна, характеризуется тем, что разогрев материала сцинтиллятора осуществляют при температуре 170–180 °С, давлении 120–140 кг/см<sup>2</sup>, при этом формирование волокна проводят методом экструзии со скоростью 1,5–2,0 м/час, а в качестве материала сцинтиллятора используют галогениды металлов при следующем соотношении ингредиентов, мас. %: хлорид серебра 18,0–20,0, бромид серебра 79,4–80,5, иодид серебра 0,1–0,5, иодид одновалентного таллия 0,5–1,0.

Технический результат – получение методом экструзии из кристаллов на основе твердых растворов галогенидов серебра, легированных Тl, гибких и длинных волоконных сцинтилляторов, обладающих максимумом спектра свечения на длине волны 550 нм.

**Патент 2173867 РФ**

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ**

**G02B6/16, C03B37/018**

Код(ы) МПК

Библиографическая  
ссылка

Пат. 2173867 РФ. Способ получения волоконных световодов / Зелянский А. В., Копытов С. М., Жукова Л. В., Жуков В. В. Заявл. 10.05.2000; опубл. 20.09.2001. Бюл. № 36.

**Реферат**

На заготовки из галогенидов серебра либо галогенидов одновалентного таллия, либо галогенидов цезия осаждают плотный дисперсионный слой, соответствующий составу световода, из растворов, которые содержат в равных соотношениях галогенводородную кислоту, например HCl либо HBr и аммиак. Технический результат: при экструзии такой заготовки в контейнере создается реактивная галогенводородная атмосфера, которая способствует устранению процесса окисления галогенидов металлов.

**Патент 2598093 РФ**

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ И СТАБИЛИЗАЦИИ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ ГЕРМАНО-СИЛИКАТНЫХ СТЕКЛОВОЛОКОН**

Код(ы) МПК

**C03C25/62**

Библиографическая  
ссылка

Пат. 2598093 РФ. Способ повышения радиационной стойкости и стабилизации светопропускания германо-силикатных стекловолокон / Шульгин Б. В., Ищенко А. В., Бажуков С. И., Шонохова А. А., Штыков А. Н., Шалимов Л. Н., Манько Н. Г., Шестаков Г. В., Иванов В. Ю., Клинов Ф. М., Жукова Л. В., Корсаков А. С., Андреев В. С., Петров В. Л. Заявл. 10.05.2000; опубл. 20.09.2001. Бюл. № 36.



## Реферат

Изобретение относится к германо-силикатным стекловолокнам. Технический результат изобретения заключается в снижении уровня радиационно-наведенного поглощения, повышении трансмиссионных свойств и надежности Ge – SiO<sub>2</sub> стекловолокон, работающих в радиационных полях. Германо-силикатные стекловолокна облучают на воздухе пучком электронов с энергией 10 МэВ, при токе 1000 мкА в несколько этапов, доводя дозовую нагрузку до 20, 30, 40 и 50 кГр с промежуточными отжигами стекловолокон при комнатной температуре в течение 2–3 часов после каждого этапа облучения.

Изобретение относится к области технологий, улучшающих/стабилизирующих трансмиссионные характеристики стекловолокон, относится к области технологий, повышающих радиационную стойкость и стабилизирующих светопропускание германо-силикатных стекловолокон, используемых в волоконно-оптических линиях связи и в других устройствах волоконной оптики: в волоконно-оптических гироскопах, датчиках вибрации и других волоконно-оптических датчиках внешних физических воздействий.

## Патент 2190240 РФ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР G01T1/20

Код(ы) МПК

Библиографическая  
ссылка

Пат. 2190240 РФ. Сцинтилляционный детектор / Шульгин Б. В., Королева Т. С., Петров В. Л., Райков Д. В., Жукова Л. В., Жуков В. В., Шульгин Д. Б. Заявл. 13.11.2000; опубл. 27.09.2002 Бюл. № 24

## Реферат

Использование: в комплексах и системах радиационного мониторинга для обнаружения делящихся материалов и радиоактивных веществ в недоступных для обычных детекторов каналах, щелях, лабиринтах, трубах; изобретение пригодно также для регистрации нейтрино при глубоководных измерениях. Сущность: сцинтиллятор датчика выполнен в виде сцинтилляционного волоконно-оптического кабеля, состоящего из чехла-оболочки и витой пары или набора не-

скольких витых пар из волоконно-оптических нитеподобных сцинтилляторов-световодов, один из которых, неорганический сцинтиллятор, изготовленный из галогенидов серебра ( $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ ) с активирующими добавками, чувствителен к гамма-излучению и замедленным нейтронам, второй, органический сцинтиллятор, выполнен из пластика  $(\text{CH})_n$ , чувствителен к быстрым нейтронам. Выносной конец сцинтилляционного кабеля снабжен отражателем света, а другой конец оптически соединен с фотоэлектронным умножителем. Технический результат – возможность обнаружения радиационного излучения в труднодоступных местах, повышение эффективности регистрации нейтрино.

**Патент 2248011 РФ**  
**СВЕТОВОЛОКОННЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ**  
**ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**  
**G01T1/20, G02B6/00**

Код(ы) МПК

Библиографическая  
ссылка

Пат. 2248011 РФ. Световолоконный сцинтилляционный детектор рентгеновского излучения / Шульгин Б. В., Жукова Л. В., Петров В. Л., Райков Д. В., Черепанов А. Н. Заявл. 07.07.2003 опубл. 10.03.2005 Бюл. № 7

### Реферат

Использование: в системах радиационного мониторинга. Сущность: детектор содержит блок регистрации рентгеновского излучения в виде набора волоконно-оптических сцинтилляторов; содержит передающий блок волоконно-оптической связи, выполненные в виде единого волоконно-оптического модуля; фотоприемное устройство с блоком электронной обработки сигналов в виде оптической системы пикселей. Единый волоконно-оптический модуль выполнен в виде цельных волокон на основе галогенидов серебра  $\text{AgCl} - \text{AgBr} - \text{AgI}$ , причем регистрирующая часть содержит активирующую добавку, а передающая часть выполнена без активирующих добавок. Технический результат – повышение эффективности регистрации.

**Патент 2668247 РФ**

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА И ТАЛЛИЯ (I)**

Код(ы) МПК

**C30B 11/02 (2006.01), C30B 29/12 (2006.01),  
C02B 1/02 (2006.01), B82B 3/00 (2006.01),  
B82Y 20/00 (2011.01), B82Y 40/00 (2011.01)**

Библиографическая  
ссылка

Пат. 2668247 РФ. Способ получения кристаллов твердых растворов галогенидов серебра и таллия (I) / Корсаков В. С., Львов А. Е., Корсаков А. С., Салимгареев Д. Д., Корсаков М. С., Жукова. Заявл. 26.12.2017 опубл. 27.09.2018 Бюл. № 27

**Реферат**

Изобретение относится к области получения кристаллов на основе твердых растворов бромида серебра ( $\text{AgBr}$ ) и иодида одновалентного таллия ( $\text{TlI}$ ). Кристаллы прозрачны от видимой до дальней инфракрасной (ИК) области спектра (0,5-67,0 мкм), пластичны, не обладают эффектом спайности, поэтому из них изготавливают методом горячего прессования оптические изделия (линзы, окна, пленки) и получают методом экструзии микроструктурированные световоды для среднего ИК-диапазона (2,0-25,0 мкм). Такие оптические изделия и ИК-световоды необходимы для создания волоконных лазеров и усилителей, волоконно-оптических систем для ИК-спектроскопии, в том числе в условиях повышенного радиационного фона, низкотемпературной ИК-пирометрии, для передачи ИК-излучения  $\text{CO}$  (5,3-6,2 мкм) и  $\text{CO}_2$ -лазеров (9,2-11,4 мкм). Способ включает синтез твердых растворов гидрохимическим методом, их расплавление и последующее выращивание кристаллов в ростовой печи по методу Бриджмена, при этом предварительно в верхней зоне ростовой печи устанавливают температуру 450-470°C, в нижней зоне 250-260°C, а выращивание кристаллов осуществляют при осевом температурном градиенте в зоне кристаллизации 50-60°C/см

между верхней и нижней зонами и скорости роста 0,2-0,4 мм/ч. Кристаллы твердых растворов содержат бромид серебра и иодид одновалентного таллия при следующем соотношении ингредиентов, мас. %: бромид серебра 1,0-20,0; иодид одновалентного таллия 99,0-80,0. Полученные кристаллы системы AgBr-TlI, содержащие от 1,0 до 20,0 мас. % AgBr в TlI, обладают следующими преимуществами: расширен диапазон прозрачности кристаллов до дальней ИК-области спектра, т.е. спектральное пропускание составляет от 0,5 до 67,0 мкм; кристаллы устойчивы к длительному УФ-облучению (более 10 часов); кристаллы устойчивы к радиационному гамма-облучению дозой до 1000 кГр и более.

**Патент 2413257 РФ**

**ОДНОМОДОВЫЙ ДВУХСЛОЙНЫЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ИНФРАКРАСНЫЙ СВЕТОВОД**

Код(ы) МПК

**G02B 6/02 (2006.01)**

Библиографическая  
ссылка

Пат. 2413257 РФ. Одномодовый двухслойный кристаллический инфракрасный световод / Чазов А. И., Жукова Л. В., Корсаков А. С., Жуков В. В. Заявл. 24.02.2009, опубл. 27.08.2010 Бюл. № 24

### **Реферат**

Изобретение относится к одномодовым двухслойным кристаллическим инфракрасным световодам для спектрального диапазона от 2 до 45 мкм и может использоваться для изготовления волоконных кабелей тепловидения, сенсоров и волоконных лазеров среднего ИК-диапазона спектра, элементов фильтров пространственных частот. Световод на основе твердых растворов бромид серебра - йодид одновалентного таллия имеет сердцевину диаметром от 10 до 130 мкм, содержащую ингредиенты при следующем соотношении, в мас. %: бромид серебра 97,0-90,0, йодид одновалентного таллия 3,0-10,0. Оболочка выполнена двухслойной. Первый слой оболочки диаметром от 100 до 300 мкм выполнен из твердых растворов бромид серебра - йодид одновалентного таллия при следующем соотношении ингредиентов, в мас. %: бромид серебра 99,5-97,0, йодид одновалентного таллия 0,5-3,0. Второй слой оболочки диаметром от

0,9 до 1,15 мм выполнен из твердых растворов бромид серебра - йодид одновалентного таллия при следующем соотношении ингредиентов, в мас. %: бромид серебра 94,0-98,0, йодид одновалентного таллия 6,0-2,0. Технический результат - расширение спектрального диапазона прозрачности световода, повышение его фотостойкости и твердости, а также позволяет подавить процесс диффузии между сердцевинной и оболочкой. Это обеспечивает четкую круглую границу между сердцевинной и оболочкой.

**Патент 2411280 РФ**  
**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ДВУСЛОЙНОГО**  
**ВОЛОКОННОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА**

Код(ы) МПК **C09K 11/08, C09K 11/62, G02B 6/02, G01T 1/20**

Библиографическая ссылка Пат. 2411280 РФ. Способ получения двуслойного волоконного сцинтиллятора / Жукова Л. В., Шульгин Б. В., Корсаков А. С., Жуков В. В. Заявл. 08.04.2008 опубл. 10.02.2011 Бюл. № 4

### **Реферат**

Изобретение относится к сцинтилляционным материалам, конкретно к двуслойным волоконным сцинтилляторам, предназначенным для регистрации тепловых нейтронов и пригодным для создания на их основе сцинтилляционных волоконных детекторов для радиационного экологического мониторинга территории, контроля космического и техногенного нейтронного фона, для создания комплексов технического контроля за ядерным топливом и изделиями из делящихся материалов, а также для создания антитеррористических комплексов радиационного контроля. Способ получения двуслойного волоконного сцинтиллятора, включает разогрев материала сердцевины и оболочки при температуре 180-190°C, давлении 150-180 кг/см<sup>2</sup> с последующим формированием двуслойной структуры волокна методом экструзии со скоростью 1,0-1,5 м/час, причем материал сердцевины сцинтиллятора содержит ингредиенты, мас. %: хлорид серебра 5,0-10,0; бромид серебра 87,5-85,0; иодид серебра 0,5-1,0; иодид одновалентного таллия 7,0-4,0, а материал обо-

лочки сцинтиллятора содержит ингредиенты, мас. %: хлорид серебра 18,0-20,0; бромид серебра 80,5-79,4; иодид серебра 0,1-0,5; иодид одновалентного таллия 0,5-1,0. Изобретение позволяет получить новое поколение гибких длинных двуслойных волоконных сцинтилляторов с максимумом спектра свечения от 600 до 800 нм. Структура двуслойного волокна обеспечивает передачу сцинтилляционного излучения практически без потерь за счет эффекта полного внутреннего отражения излучения в сердцевину волокна на границе раздела сердцевина-оболочка.

**НАГРАДЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА МЕЖДУНАРОДНЫХ  
ВЫСТАВКАХ**

1. Золотая медаль выставки «Brussels Eureka», г. Брюссель, 2001 г.



2. Золотая медаль выставки «Salon international des inventions», г. Женева, 2008 г.

# DIPLÔME



## SALON INTERNATIONAL DES INVENTIONS GENÈVE

Après examen, le Jury International a décidé  
de remettre à: L.JUKOVA, N.PRIMEROV, A.CHAZOV et A.KORSAKOV

pour l'invention: Guide d'onde optique à mode unique



MÉDAILLE D'OR  
GOLD MEDAL  
GOLDMÉDAILLE

Genève, le 4 avril 2008

  
Le Président du Jury: David Tajj

  
Le Président du Salon: Jean-Luc Vincent



3. Серебряная медаль выставки «Salon international des inventions»,  
г. Женева, 2009 г.

# DIPLÔME



## SALON INTERNATIONAL DES INVENTIONS GENÈVE

Après examen, le Jury International a décidé  
de remettre à: **UNIVERSITÉ TECHNIQUE D'URAL**  
**Zhukova L., Shulgin B., Korsakov A., Zhukov V.**  
pour l'invention: **Méthode pour l'obtention d'un scintillateur à fibres**



MÉDAILLE D'ARGENT  
SILVER MEDAL  
SILBERMEDAILLE

Genève, le 3 avril 2009

Le Président du Jury: David Tajj

Le Président du Salon: Jean-Luc Vincent

*Учебное издание*

**Жукова** Лия Васильевна  
**Корсаков** Александр Сергеевич  
**Лашова** Анастасия Алексеевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ  
ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ  
ДЛЯ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА**

Редактор *Е. Л. Михайлова*  
Верстка *А. А. Лашова*

Подписано в печать 14.12.2018. Формат 60х84/16.  
Бумага писчая. Ризография. Усл. печ. л. 14,8. Уч. изд. л. 12,8.  
Тираж 51 экз. Заказ № 280

Издательство УМЦ УПИ  
620078, Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф.2

Отпечатано в типографии  
Ризография НИЧ УрФУ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19